

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Bakalářská práce

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Izolační systém střídavého
elektromotoru nízkého napětí**
**Insulation system of LV AM electrical
motor**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Michálek**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: Izolační systém střídavého elektromotoru nízkého napětí
Insulation system of LV AM electrical motor

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Izolační systém elektrického obvodu motoru
3. Izolační materiály pro motory nízkého napětí
4. Izolační systém magnetického obvodu motoru
5. Návrh izolačního systému elektrického obvodu vybraného elektromotoru
6. Testování izolačního stavu
7. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. HÄBERLE, GREGOR: Elektrotechnické tabulky pro školu i praxi, EUROPA-SOBOTÁLES Praha 2006
2. STONE, GREG C.: Electrical insulation for rotating machines, WILEY-INTERSCIENCE 2003


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Pavel Hrbáč, Ph.D.**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010




prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení a poděkování

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce doc. Ing. Hrbáči Pavlovi, Ph.D. za ochotu a pomoc při psaní této práce.

V Ostravě dne 7. 5. 2010.



.....

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je popsat a rozdělit izolační systémy střídavých motorů nízkého napětí. Podrobně popíši složení izolačních systémů elektrických a magnetických obvodů těchto motorů, jejich jednotlivé části, elektroizolační materiály a technologické postupy vhodné k navíjení a převíjení těchto elektrických strojů. Následně pak popíši základní zkoušky izolačních systémů. V praktické části provedu návrh vinutí a izolačního systému vybraného typu motoru.

Klíčová slova

elektrický obvod, elektroizolační materiál, elektroizolační systém, izolace, magnetický obvod, vinutí střídavých motorů.

Abstract

The aim of this Bachelor is to describe and distribute the insulation systems low voltage AC motors. I describe composition of insulating systems, electrical and magnetic circuits of their individual parts, electrical materials and technological processes suitable for retraction and forward these electrical machines. Then I describe basic tests insulation systems. In the practical part I will design windings and isolation of the selected type of engine.

Key words

the electrical circuit, electrical insulating material, electrical insulating system, insulation, the magnetic circuit, winding AC motors.

Seznam použitých symbolů a značek

symbol	název	jednotka
C	Kapacita	F
G_u	Vodivost izolace	S
I_{b10}	Nabíjecí proud v desáté minutě měření	A
P_{i10}	Desetiminutový polarizační index	(-)
P_z	Dielektrické ztráty	W
R_{iz}	Zdánlivý izolační odpor	Ω
S_n	Jmenovitý zdánlivý elektrický výkon	VA
$\operatorname{tg} \delta$	Ztrátový činitel	(-)
U	Napětí	V
U_n	Jmenovité napětí	V
U_{zss}	Stejnoseměrné zkušební napětí	V
U_{zst}	Efektivní střídavé zkušební napětí	V
ω	Úhlová rychlost	$\operatorname{rad} \cdot \operatorname{s}^{-1}$

Obsah

1. Úvod	3
2. Izolační systém elektrického obvodu motoru	4
2.1. Základní druhy vinutí střídavých motorů	4
2.1.1. Vsypávané vinutí	4
2.1.2. Vinutí z polotuhých a tuhých cívek	5
2.1.3. Tyčová vinutí	6
2.1.4. Vinutí nakrátko	6
2.1.5. Vinutí stejného kroku	7
2.1.6. Vinutí se soustřednými cívkami	7
2.1.7. Jednovrstvová vinutí	9
2.1.8. Dvouvrstvová vinutí	9
2.1.9. Zlomkové vinutí	9
2.1.10. Šablonové vinutí	10
2.1.1. Rotorová vinutí kroužkových motorů	10
2.1.2. Vinutí jednofázových motorů	10
2.2. Izolace vinutí střídavých motorů	11
2.2.1. Izolace vodičů	11
2.2.2. Drážková izolace	16
2.2.3. Impregnace vinutí	17
2.2.4. Prokládání čel vinutí a jejich bandáž a uzávěry drážek elektromotorů	20
3. Izolační materiály pro motory nízkého napětí	21
3.1. Rozdělení elektroizolačních materiálů do tepelných tříd	21
3.2. Izolační materiály používané pro motory nízkého napětí.	24
4. Izolační systém magnetického obvodu motoru.	25
4.1. Značení a rozdělení elektrotechnických plechů a pásů	26
4.2. Izolace plechů pro elektrotechniku	27
5. Návrh izolačního systému elektrického obvodu vybraného elektromotoru	28
5.1. Popis a parametry elektromotoru	28
5.2. Přepočet vinutí na jiné napětí, volba vodiče	29
5.3. Návrh drážkové izolace, výpočet činitele plnění drážky	30
5.4. Návrh ostatních částí izolačního systému elektromotoru:	33
6. Testování izolačního stavu	35
6.1. Stejnoseměrné metody	35
6.1.1. Měření zdánlivého izolačního odporu	35
6.1.2. Polarizační index	35
6.2. Zkoušky přiloženým napětím	36
6.2.1. Zkouška střídavým napětím 50 Hz	36
6.2.2. Zkouška stejnosměrným napětím	37

6.2.3. Zkouška napětím velmi nízkého kmitočtu	38
6.2.4. Impulsní srovnávací zkouška	38
6.3. Měření ztrátového činitele	38
6.4. Měření napěťové závislosti elektrické vodivosti	39
7. Závěr	40
Seznam literatury a internetových zdrojů	41
Seznam obrázků	42
Seznam tabulek	43

1. Úvod

Tématem mé bakalářské práce jsou Izolační systémy střídavých motorů nízkého napětí. Tuto práci jsem si zvolil, protože pracuji v opravárenském podniku zabývajícím se opravami elektrických strojů a přístrojů. Téma je mi blízké, protože dennodenně ve své práci přicházím do styku s různými izolačními systémy.

Cílem teoretické části mé bakalářské práce je popsat a rozdělit izolační systémy střídavých motorů nízkého napětí. Cílem praktické části je provedení návrhu vinutí a izolace vybraného typu motoru.

Práce je členěna do 7 kapitol. První kapitolou je úvod. V druhé kapitole se zabývám izolačními systémy elektrických obvodů. Popisuji zde základní druhy vinutí střídavých motorů a jejich izolace. Ve třetí kapitole uvádím izolační materiály pro motory nízkého napětí a jejich rozdělení do tepelných tříd. Čtvrtá kapitola je zaměřena na izolační systémy magnetického obvodu motoru, zde uvedu rozdělení a značení plechů a pásů pro elektrotechniku a následně jejich izolování. V páté kapitole provedu návrh vlastního izolačního systému vybraného asynchronního motoru nakrátko včetně přepočtu parametrů vinutí při změně na jiné napětí. V šesté kapitole popisuji testování izolačního stavu daných izolačních systémů. Závěr práce obsahuje celkové zhodnocení a v seznamech jsou uvedeny jednotlivé obrázky, tabulky a přílohy.

2. Izolační systém elektrického obvodu motoru

2.1. Základní druhy vinutí střídavých motorů

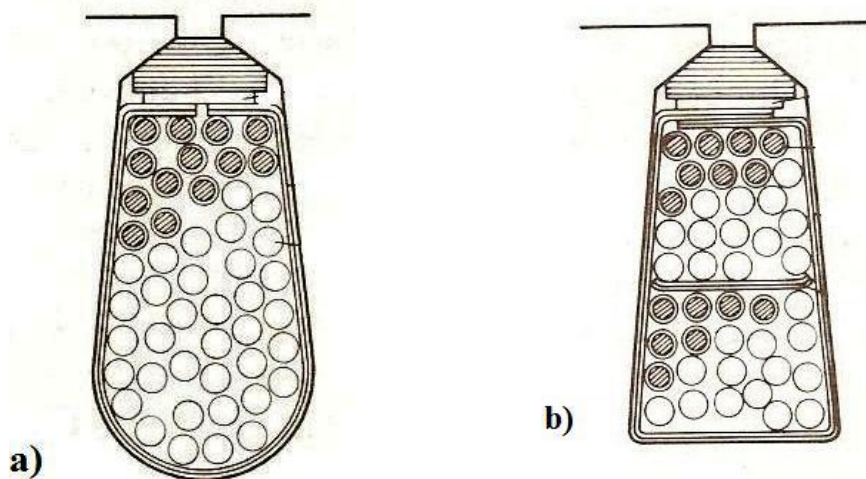
Elektrické obvody střídavých strojů tvoří vinutí, které lze rozdělit podle určitých kritérií:

- Podle konstrukce se střídavá vinutí dělí na vsypávané s vodiči kruhového průřezu, vinutí s tuhými cívkami, tyčová vinutí, a rotorová vinutí nakrátko.
- Podle tvaru cívek jsou vinutí rozložená a vinutí s cívkami soustřednými.
- Podle vrstev uložení cívkových stran jsou vinutí jednovrstvová a dvouvrstvová.
- Podle způsobu zhotovení rozlišujeme vinutí ručně navíjené do drážek nebo vinutí šablonové.

V následujících kapitolách se budu zabývat jednotlivými základními vinutími střídavých strojů.

2.1.1. Vsypávané vinutí

Vsypávané vinutí se ukládá do polozavřených drážek s úzkým otevřením, kterým se postupně jednotlivé vodiče vkládají do drážky („vsypávají“). Při strojním navíjení se podle typu navíječích strojů buď každý závit bezprostředně navíjí do drážky bez předchozího navíjení cívkových polotovarů, nebo se předem navinou skupiny cívek, které se potom vtahují do potřebných drážek. Největší průměr drátu používaný u vsypávaných vinutí nepřevyšuje zpravidla 1,8 mm, protože vodiče většího průměru jsou příliš tuhé, špatně se upevňují v drážkách a mají malý činitel plnění drážky. Potřebného průřezu vodiče se dosahuje použitím několika dílčích paralelních vodičů. Vsypávané vinutí se používá, pro svou malou elektrickou pevnost a malou mechanickou pevnost cívek pro motory do výkonu 100 kW, při jmenovitých napětích do 660 V.

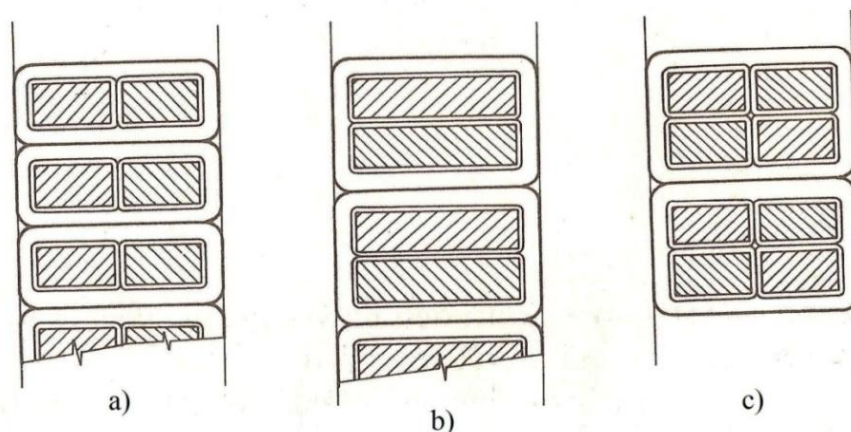


Obr. č. 1. a) Příčný řez drážky S, se vsypávaným jednovrstvým vinutím, b) příčný řez drážky L se vsypávaným dvouvrstvovým vinutím [1]

2.1.2. Vinutí z polotuhých a tuhých cívek

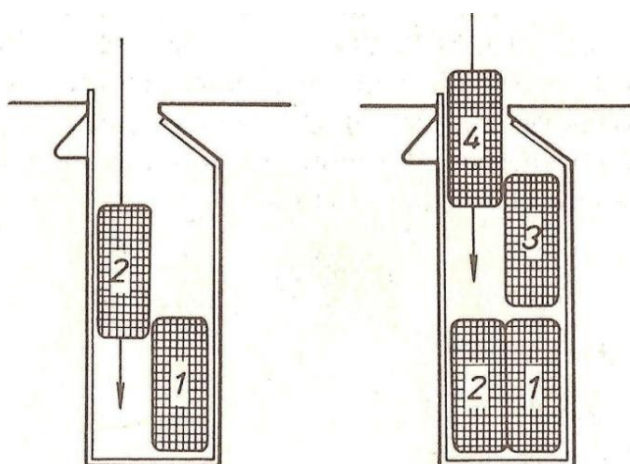
Pro tato vinutí se vyrábějí cívky z vodiče z pravoúhlého průřezu z důvodu zvýšení mechanické pevnosti. Cívky se navíjejí v tvarovacích šablonách a ještě před uložením do drážek se jím dává konečný tvar a úprava. Po vložení do drážek se čela cívek navzájem prováží bavlněnou tkaninou. Při větších rozměrech čel cívek se čela připevňují k podpěrným kruhům.

U vysokonapěťových stojů mají cívky průběžnou nebo kombinovanou izolaci a ukládají se do otevřených drážek obdélníkového tvaru. Takové vinutí má pak tuhé cívky. Ty se mohou ukládat do drážek v různých polohách (viz. Obr. č. 2).



Obr. č. 2. Vzájemná poloha profilovaných vodičů v cívce, a) dva paralelní pásy vedle sebe, b) dva paralelní pásy pod sebou, c) čtyři paralelní pásy [1]

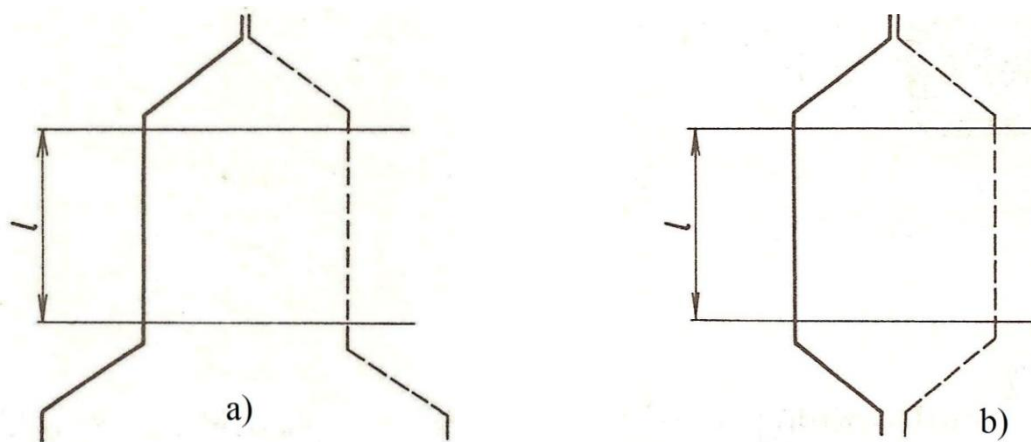
U nízkonapěťových strojů, kde na izolaci nejsou kladeny zvláštní požadavky, je možné použít polotuhé cívky. Tyto cívky se rovněž navíjejí na tvarovacích šablonách. U tohoto způsobu se izolují pouze drážky, cívky jsou bez izolace. Protože cívka nemá celkovou izolaci, je možné ji rozdělit na dvě cívky v jedné vrstvě šířky drážky, a tak je možné i zmenšit otevření drážky. Drážka je pak polozavřená typu F. Postup při ukládání cívek je pak na obr. č. 3.



Obr. č. 3. Postup při ukládání cívek do polozavřených drážek typu F [1]

2.1.3. Tyčová vinutí

Vinutí, není z cívek ale tyčí, kde jedna tyč představuje polovinu cívky. Tyče se ukládají do drážek postupně, až po založení se navzájem spojují, čímž vytvářejí závity vinutí. Tyčové vinutí může být podle směru ohýbání čel vinutí proti drážkám smyčkové nebo vlnové (viz. Obr. č. 4).

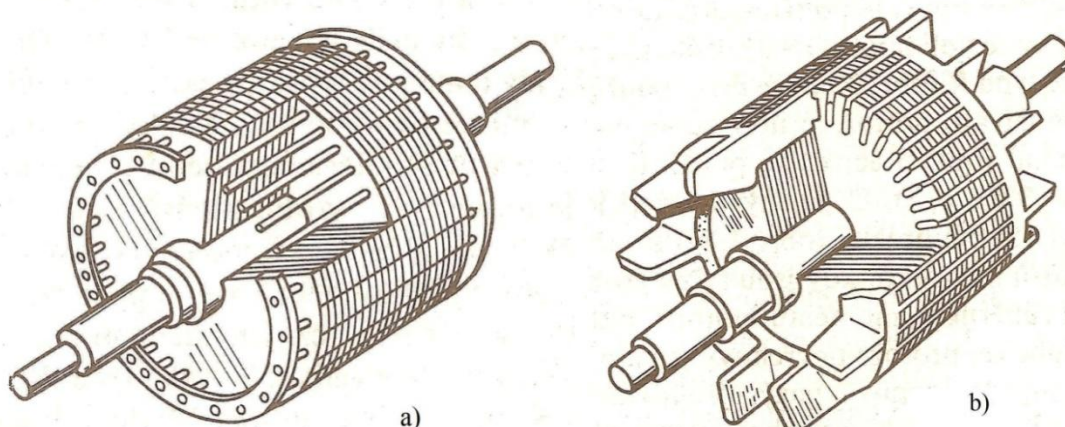


Obr. č. 4. Schematické znázornění tyčového vinutí a) vlnového, b) smyčkového [1]

2.1.4. Vinutí nakrátko

Tato vinutí se používají v rotorech asynchronních motorů nakrátko a v rotorech synchronních strojů, jako rozběhová vinutí nebo amortizéry. Vinutí nakrátko nemá izolaci mezi drážkovou částí vinutí a stěnami drážky. U rotorů asynchronních motorů se vinutí nazývají klece nakrátko. Podle konstrukce a výrobní technologie můžeme rozdělit na dva základní typy:

- Natvrdo pájené (viz. Obr. č. 5 a) – tyče vinutí se nasunou do drážek a potom se na čele spojí kruhy na krátko, které se natvrdo připájí nebo přivaří.
- Odlévané ze slitin hliníku (viz. Obr. č. 5 b) – tyče i kruhy nakrátko se odlévají současně do jednoho celku včetně ventilačních lopatek.

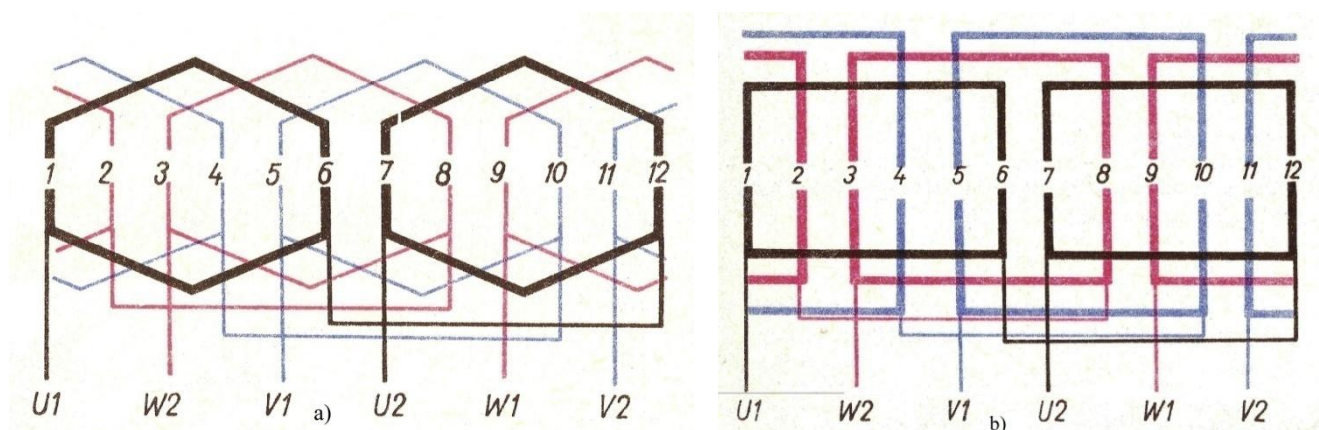


Obr. č. 5. Rotory nakrátko asynchronních motorů, a) s natvrdo pájeným vinutím, b) s odlévaným vinutím [1]

2.1.5. Vinutí stejného kroku

Vinutí stejného kroku, má všechny cívky stejné, souměrné a pravidelně rozložené. Ukládáme je stejným krokem za sebou do statorových drážek. Čela cívek tak vytvářejí věnec (viz. Obr. č. 6a). Uložení cívek může být zhotoveno také polohově (viz Obr. č. 6b), aniž by se změnily vlastnosti motoru. Cívky z vodičů kruhového průřezu se ukládají do drážek vsypáváním. Cívky jsou od sebe vzájemně izolovány elektrotechnickou nebo drážkovou lepenkou, abychom od sebe oddělily různé fáze. Hotové vinutí se na čelech ovine tkanicí a dojde tak k jejímu zpevnění.

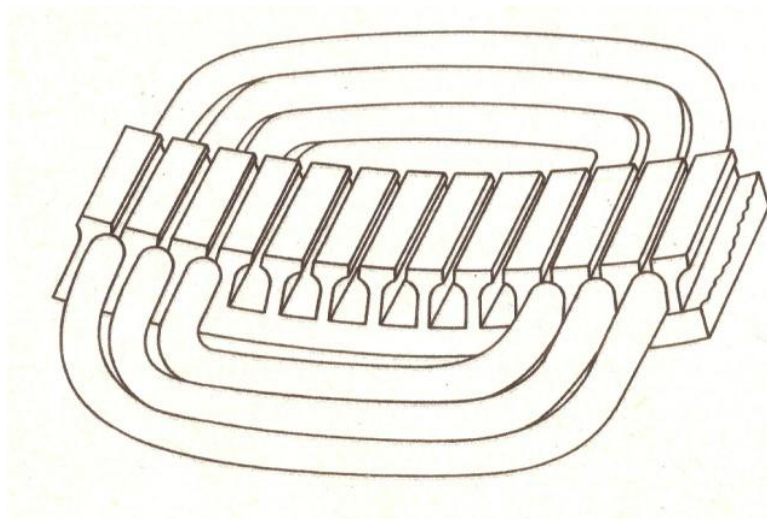
Jednovrstvové vinutí se stejnými cívkami se používá převážně u strojů malých výkonů (asi 100 až 200 W), například čerpadel k obráběcím strojům.



Obr. č. 6. Schéma zapojení jednovrstvého vinutí stejného kroku a) do věnce, b) polohově [2]

2.1.6. Vinutí se soustřednými cívkami

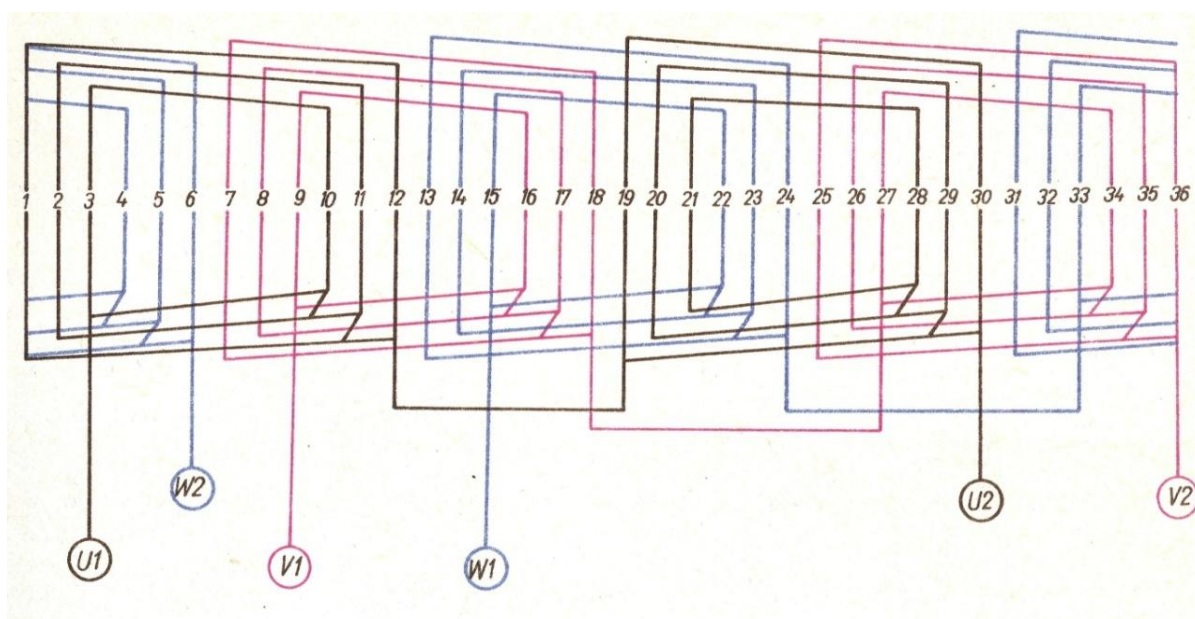
Tato vinutí používaná jen pro navíjení střídavých strojů mají cívky uspořádané do skupin způsobem od nejmenší cívky k největší. Jednotlivé cívky mají zdánlivě různý krok závislý na počtu drážek statorů a počtu pólů motorů. Cívky takto uložené v drážkách tvoří skupiny podle počtu drážek na pól a fází. Mohou to být skupiny se dvěma, třemi i více cívkami. Čím více má magnetický obvod statoru drážek, tím větší je počet cívek ve skupině. Cívky těchto skupiny se nekřížují na čelech, ale jsou uloženy v soustředném svazku (viz. Obr. č. 7). Tyto vinutí se snadno izolují. Cívky uložené v jednotlivých drážkách se mohou v čelech izolovat bavlněnou tkanicí. Celé skupiny se v čelech mezi jednotlivými fázemi prokládají drážkovou nebo elektrotechnickou lepenkou či fibrem. Koš vytvořený z čel cívek se izoluje izolační tkanicí, která současně tvoří bandáž.



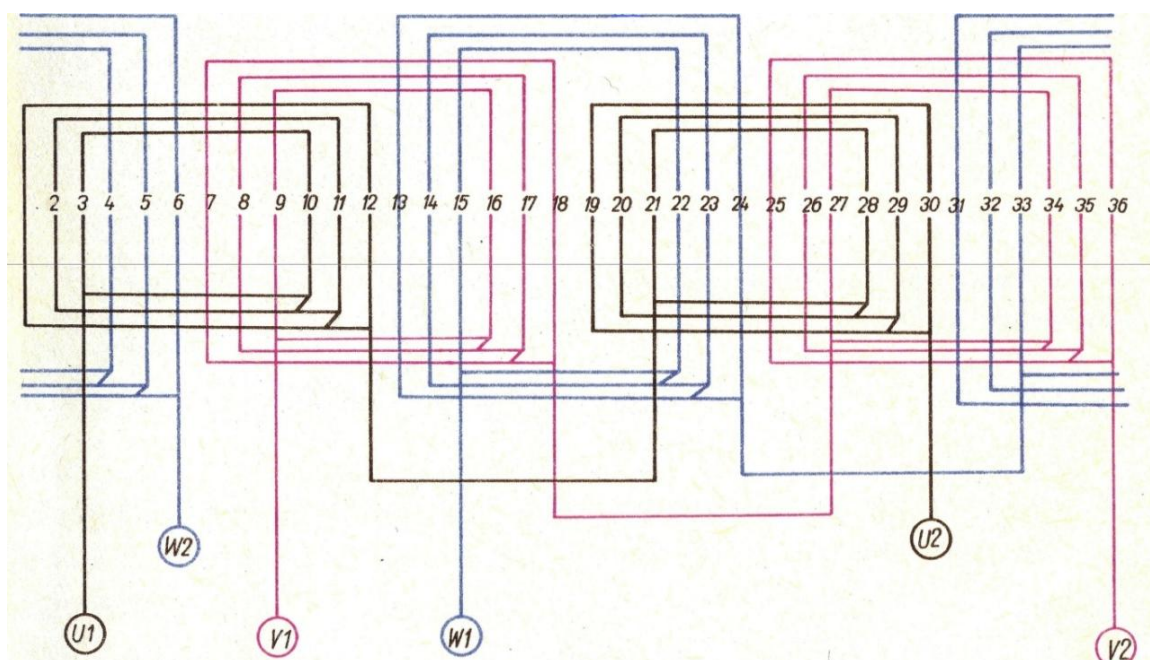
Obr. č. 7. Skupina soustředných cívek [2]

Ukládání vinutí se soustřednými cívkami do drážek můžeme rozdělit na dva způsoby:

- Do věnce, kde jsou skupiny cívek ukládány do drážek za sebou, tak že vytvářejí pravidelný věnec z čel cívek (viz. Obr. č. 8).
- Polohové (viz. Obr. č. 9), které se ve většině případů zhotovuje ve dvou nebo třech polohách. U malých strojů se toto vinutí zhotovuje šablonově, u větších se navíjí ručně do drážek závit po závit. Vinutí zhotovená ručním způsobem ukládáme do drážek skupiny cívek od nejmenší k největší. Podle počtu pólů se toto vinutí zhotovuje ve třech nebo dvou polohách. Pokud je vinutí geometricky nesouměrné používá se přechodový svazek.



Obr. č. 8. Schéma vinutí se soustřednými cívkami uloženými do věnce [2]



Obr. č. 9. Schéma vinutí se soustřednými cívkami s polohovým uložením [2]

2.1.7. Jednovrstvová vinutí

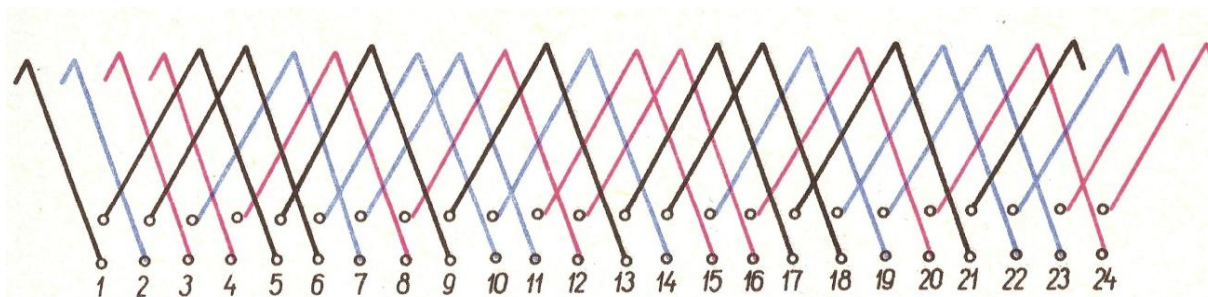
U jednovrstvových vinutí je počet cívek poloviční oproti počtu drážek. Tato vinutí, mohou být podle uspořádání čel cívek v několika variantách nejčastější, jsou to jednovrstvová vinutí se stejnými cívkami a jednovrstvová soustředná vinutí. Tyto vinutí jsou popsány v předchozích kapitolách.

2.1.8. Dvouvrstvová vinutí

U dvouvrstvových vinutí jsou v každé drážce dvě cívkové strany. Počet všech cívek se rovná počtu drážek je tedy dvakrát větší než u jednovrstvových vinutí. Protože jsou v některých drážkách uloženy cívkové strany různých fází, musí být navzájem důkladně izolovány na plné sdružené napětí. Větší počet cívek a nutnost důkladnější izolace mezi čely zvětšují pracnost dvouvrstvového vinutí, ale magnetické pole vybuze tímto vinutím má lepší průběh. Další výhodou dvouvrstvového vinutí je, že při zkráceném kroku vycházejí kratší čela cívek, takže spotřeba mědi je menší a tím také menší Jouleovy ztráty.

2.1.9. Zlomkové vinutí

Zlomkové vinutí se používá u mnohopólových motorů s malým počtem drážek nebo u motorů s jiným počtem pólů (tzn. počet drážek na pól a fází neodpovídá celému číslu počtu statorových drážek). Zlomková vinutí jsou většinou ze stejných cívek, které se zapojí do skupin, počet cívek ve skupinách je různý. Skupiny cívek se tak ukládají do drážek podle navržených schémat (viz. Obr. č. 10).



Obr. č. 10. Schéma uložení cívek zlomkového vinutí [2]

2.1.10. Šablonové vinutí

Cívky vinutí z vodičů kruhového průřezu se navíjejí strojně pomocí šablon na navíjecích strojích. Šablony odpovídají rozměrům navíjených cívek. Při jednotlivých se používají univerzální šablony u nich lze individuálně rozpětí a délku cívek. Při větším počtu kusů se vyplatí zhotovit dřevěnou šablonu, kterou lze použít pro jedno rozpětí. Při navíjení musíme dbát na to, aby lakované vodiče byly vedeny paralelně a nekřížili se. Po navinutí se svazek cívek sejme za šablonu a sváže se, aby se nerozpadl.

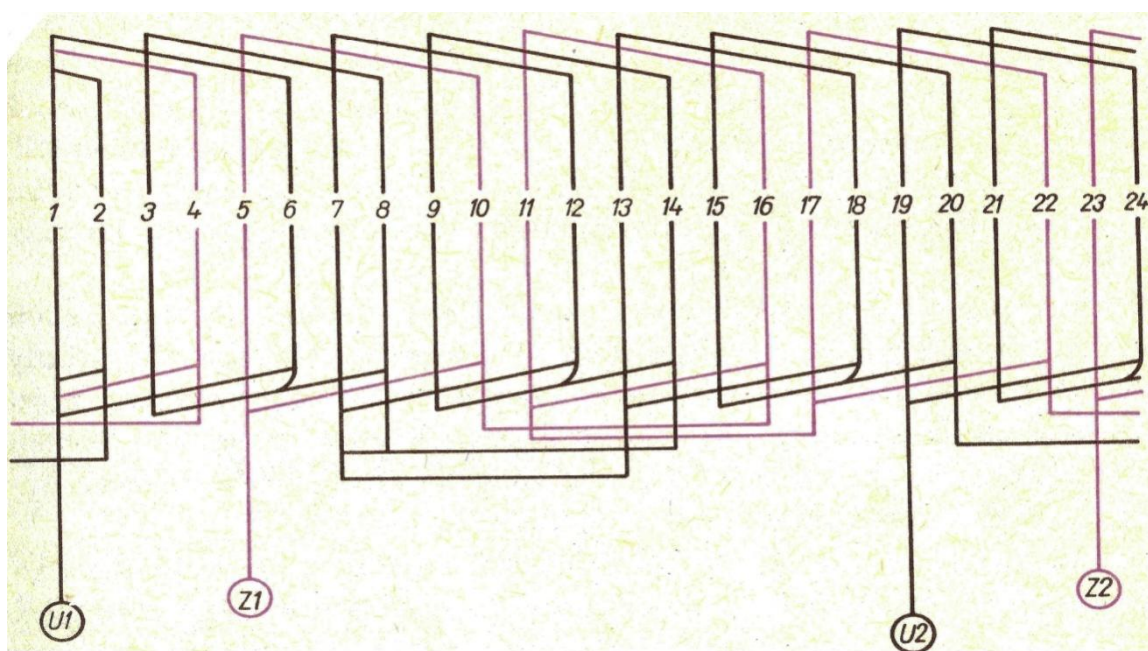
2.1.1. Rotorová vinutí kroužkových motorů

Tato vinutí se ve své konstrukci a uspořádání zásadně neliší od statorových vinutí. U menších strojů se křivková vinutí z vodičů vsypávají do drážek. Na rozdíl od statorových vinutí jsou rotorová vinutí vystavena odstředivým silám, takže zvláště na čelech vinutí a na vývodech musí být provedena přídatná opatření k zachycení těchto sil. Rotorová vinutí nejsou připojena k síti, což umožňuje nezávislejší dimenzování izolace.

2.1.2. Vinutí jednofázových motorů

Vinutí jednofázových motorů se zhotovuje jako polohové. U jednofázových motorů s pomocným odporovým vinutím se nejčastěji zhotovuje vinutí ve dvou polohách se soustředěnými cívkami. Hlavní vinutí se ukládá do spodní části drážky statoru. Pomocné vinutí je uloženo v horní části drážky statoru. U jednofázových motorů s rozběhovým kondenzátorem je vinutí v některých případech uspořádáno obráceně (pohony kompresorů chladniček). Hlavní a pomocné vinutí jsou od sebe vzájemně izolovány drážkovou lepenkou, čela jsou zpevněna bandáží s bavlněnou tkanicí.

Vinutí jednofázových motorů se zhotovují také jako jednovrstvová na plnou drážku. Cívky hlavního i pomocného vinutí jsou uloženy v samostatných drážkách. Vinutí jsou v čelech vzájemně izolována drážkovou lepenkou, bandáž se zhotovuje bavlněnou tkanicí. Jednovrstvové vinutí můžeme také zhotovit uložением cívek stejným krokem za sebou na plnou drážku do věnce (viz. Obr. č. 11). Do drážek ukládáme cívky hlavního vinutí střídavě s cívkami pomocného vinutí. Stejně jako u motorů třífázových.



Obr. č. 11. Schéma jednovrstvového vinutí jednofázového motoru uloženého do věnce [2]

2.2. Izolace vinutí střídavých motorů

Izolace vodiče elektrického motorů má vodič izolovat proti magnetickému obvodu, v němž je uložen, proti sousedním vodičům a jiným neaktivním částem. Hlavní požadavky, kladené na izolaci elektrických strojů jsou velká elektrická pevnost a dobrá tepelná vodivost. Mezi ostatní požadavky patří mechanická pevnost, odolnost proti vlhkosti, tepelná stálost a odolnost proti chemickým vlivům. Tyto ostatní požadavky jsou kladeny na izolaci jen z hlediska její schopnosti zachovat elektrickou pevnost při jejím technologickém zpracování a při dlouhodobé činnosti elektrických motorů při určeném druhu zatížení a působení okolního prostředí.

Izolační systémy můžeme rozdělit podle funkce na izolaci vodičů, drážkovou izolaci a impregnaci, bandážování tkanicí a prokládání v čelech vinutí.

2.2.1. Izolace vodičů

Izolace vodiče, je izolace, jíž je opatřen vodič, ze kterého se vyrábí vinutí. Izolace vodičů je tvořena lakem, opředěním nebo ovinutím bavlnou, skleněnými vlákny, případně kombinací pevné a nanášené izolace. Izolace vodičů odděluje sousední vodiče jedné cívky. Protože se cívka skládá z více závitů, má izolace vodiče velký vliv na celkový rozměr cívky. Z konstrukčního hlediska je požadována co nejmenší tloušťka izolace. Přesto musí být cívka při výrobě a při provozu odolná vůči mnohým elektrickým a mechanickým vlivům. Nejvíce používané jsou vodiče, na které se pomocí vhodných strojů nanáší vrstva laků, která se vytvrzuje při teplotě asi 180° C a více, podle použitého laku. Po vytvrzení se na vodiči vytvoří měkký smalt, odolný mechanickému i elektrickému namáhání.

Značení smaltovaných a opředěných vodičů používaných u nás se skládá ze čtyř nebo pěti velkých písmen. Označení je následující:

- První písmeno určuje izolaci:

L – lakovaná izolace

O – opředěná (ovinutá) izolace

- Druhé písmeno značí kov jádra:

C – Měď

Al – Hliník

- Třetí písmeno určuje druh izolace:

Lakované vodiče

I – Polyesterimid

A – Akrylát

E – Epoxid

F – Polyvinylacetát

C – Samolepivý polyvinylacetát

N – Polytetrafluóretylén

O – Olej

P (PL) – Polyamid

S – Silikon

T – Tereftalát

U – Polyuretan

X – Polytrifluórchlóretylén

Opředěné vodiče

R – Jednoduché opředění polyesterovou přízí

P – Jednoduché ovinutí papírem

K – Jednoduché opředění skleněnou přízí

E – Polyetyléntereftalát

V – Sklo a polystyrenová příze

V současnosti používáme k izolaci měděných vodičů tyto izolační laky:

- Základní: Polyesterimid, Theic mod, Polyurethan, Polyurethan (modifikovaný).
- Vrchní: Amid - imid, Polyamid (termolepivý), Polyamid (nylon).
- Druhá vrchní vrstva: Polyamid (termolepivý).

Pro vinutí elektrických motorů se dnes setkáváme s lakovanými vodiči například těchto typu:

- **Duroflex**

je složený z modifikovaného polyvinylformalu, patří do tepelné třídy 120 (E), jeho charakteristická vlastnost je mechanická odolnost, jeho použití je vhodné pro olejové transformátory, motory a přístroje.

- **Thermex**

je složený z modifikovaného esterimidu, patří do tepelné třídy 180 (H), jeho charakteristická vlastnost je tepelná odolnost, je vhodný pro motory, transformátory, přístroje

- **Soldex**

je složený z modifikovaného polyuretanu, vyrábí se pro teplotní třídy 130 (B), 155 (F), jeho charakteristická vlastnost je dobrá pájitelnost, je vhodný pro malé motory, relé, magnetické cívky, elektronika

- **Thermibond**

jeho složení je z modifikovaného polyesterimidu a backlaku, je vytvrditelný při 190-220°C, je vhodný pro pólové cívky, budicí cívky, vinutí statorů asynchronních a univerzálních motorů, tlumivky

- **Samica**

je složený z pásek na bázi slídového papíru, patří do teplotní třídy 180 (H), vyrábí se profilový a kulatý, je vhodný pro vysokonapěťové stroje, motory, napájené z frekvenčních měničů.

- **Aramidový papír**

je složen z aromatického polyamidu např. Nomexu, patří do teplotní třídy 180 (H), vyrábí se kulatý a profilový, používá se pro suché transformátory, tlumivky, pólové cívky

- **Polyimid**

je složen z polyimidová fólie např. Kaptonu, patří do tepelné třídy 220 (R), je vhodný pro trakční motory, motory pro válcovací stroje, těžní stroje, motory pro lodě a letadla

- **Silix**

je složen, ze skelného vlákna, které se impregnuje polyesterimidovou, silikonovou nebo epoxidovou pryskyřicí, patří do teplotní třídy 200 (N), vyrábí se jako kulatý a profilový, je vhodný pro Roebelovy tyče, točivé stroje, suché transformátory, topná tělesa

- **Daglas**

je složen ze smíšeného vlákna, skla a polyesteru, může být neimpregnovaný nebo impregnovaný polyesterimidovou, silikonovou nebo epoxidovou pryskyřicí, patří do teplotní skupiny 180 (H), vyrábí se kruhového průřezu nebo je profilový, je vhodný pro Roebelovy tyče, točivé stroje, suché transformátory a topná tělesa.

Izolaci cívkových vodičů může také rozdělit podle provedení na průběžnou nebo kombinovanou.

- **Průběžná izolace**

Je vytvořena navíjením několika vrstev izolační pásky průběžně po celé délce cívky. Po zhotovení izolace se cívka impregnuje nebo napouští. Nejrozšířenějším typem tohoto navíjení je izolace z několika vrstev mika pásky napuštěná bitumenovým komponentem. Výhodou je z hlediska elektrické pevnosti její spolehlivost, protože nemá nehomogenní místo styku jako kombinovaná izolace.

- **Kombinovaná izolace**

Provádí se tak, že část cívky uložené v drážce statoru se ovíjí několika vrstvami remikafólie. Potom se za tepla lisuje na dané rozměry a vytvrzuje se. Čela vinutí se izolují izolačními páskami (remika páska). Tato izolace díky zahřátí a zchladnutí získává velmi dobré mechanické vlastnosti, vysokou pevnost a tepelnou stálost. Izolace se vyrábí pro různé tepelné třídy podle typu použitých materiálů a

pojidel. Výhodou kombinované izolace je vyšší elektrická pevnost v drážce oproti průběžné izolaci. Nevýhodou je menší elektrická pevnost v místě styku dvou typů izolací. To je v blízkosti výstupu rovné části cívky s drážky (tzn. místo největší intenzity elektrického pole v důsledku jeho nehomogenity). Toto místo je navíc vystaveno mechanickým deformacím při ukládání do drážek i při práci stroje.

2.2.2. Drážková izolace

Drážková izolace se vyrábí z drážkové lepenky či aramidového papíru v kombinaci s polyetylentereftalátovou fólií. Tato fólie se často kombinuje i s jinými materiály, se skleněnou tkaninou, polyesterovou rohoží a slídovým papírem. Kombinace vrstvených drážkových izolantů je závislá na napětí stroje a maximální provozní teplotě. Drážková izolace se umísťuje přímo na cívky vinutí, nebo vkládá do drážek stroje před ukládáním vinutí.

Podle umístění a funkce je drážková izolace rozdělena na několik typů:

- **Podložky na dno drážek**

chrání drážkovou izolaci před poškozením, nejčastěji vznikajícím při zaklínování vlivem nerovného dna drážky.

- **Podložky pod klín**

chrání vinutí před poškozením při klínování a také slouží k dostatečnému upevnění cívek v drážkách vhodnou volbou počtu podložek s různými tloušťkami.

- **Vložky mezi vrstvami vsypávaných a dělených vinutí**

tvoří izolační mezivrstvy mezi vodiči horní a dolní vrstvy. U vinutí s tuhými cívkami zajišťují mezivrstvové vložky konstantní vzdálenost na výšku mezi aktivními stranami cívek horní a dolní vrstvy, aby se tím kompenzovalo zesílení izolace v čelech, kde izolace nemůže být slisována a aby se zamezilo vzájemnému dotyku cívek patřících k různým fázím při jejich křížení v čelních partiích. Vynecháním této vložky je možno do vzniklého prostoru vložit teplotní senzor.

Vybrané druhy drážkových izolací:

Drážková izolace určená pro motory tepelné třídy 155 (F) se označuje Ne a NEN. K výrobě drážkových izolací NE a NEN se používá těchto materiálů:

- N - polyesterová fólie tloušťky 50 μm , 75 μm , 125 μm , 190 μm , 250 μm .
- E - polyesterová rohož.
- pojídlo - polyesterové lepidlo.

Drážková izolace NE a NEN při ohybu o 180° se nesmí rozvrstvovat. V příloze č. 1. je uvedena tabulka s vlastnostmi drážkových izolací typu NE a NEN.

Pro motory tepelné třídy 180 (F) se rovněž používá drážková izolace typu WG-1a WG-2 .

- WG-1 se vyrábí spojením polyesterové fólie a hlazené polyesterové rohože polyuretanovou pryskyřicí.

- WG-2 je vyrobena z polyesterové folie spojením z obou stran hlazenou polyesterovou rohoží polyuretanovou pryskyřicí.

Drážkové izolace určené pro motory tepelné třídy 130 (B) se označují PcPuFp-1 a PcPuFp-2.

- PcPuFp-1 se vyrábí spojením polyesterové fólie a speciální elektrotechnické lepenky polyuretanovou pryskyřicí.
- PcPuFp-2 je vyrobena ze speciální elektrotechnické lepenky a spojená z obou dvou stran polyesterovou folií polyuretanovou pryskyřicí.

NK a NKN jsou drážkové izolace určené pro motory tepelné třídy 180 (H).

- NK se vyrábí spojením poliimidové fólie s polyamidovým papírem NOMEX. Jako pojivo je použita polyuretanová pryskyřicí.
- NKN je vyrobena z poliimidové folie spojením z obou dvou stran polyamidovým papírem Nomex. Jako pojivo je použita polyuretanová pryskyřicí.

Elektrotechnická drážková lepenka (prešpan) je speciálním druhem vrstvené lisované papíroviny určené k izolaci elektrických strojů a zařízení. Je hladká, ohebná a elastická.

2.2.3. Impregnace vinutí

Vinutí motoru se musí impregnovat, protože impregnační lak zvyšuje jeho elektrickou odolnost a mechanickou pevnost. Zvyšuje tepelnou odolnost izolantů, zlepšuje odvod tepla a chrání organické látky proti navlhnutí. Povrchová vrstva laku zlepšuje odolnost proti škodlivým vlivům prostředí, jako jsou vlhko, páry, oleje, prach. Výhodou je, že se impregnované vinutí při revizních prohlídkách dobře čistí. Impregnace vinutí se provádí nejčastěji máčením, vakuotlakým způsobem nebo zakapáváním. Impregnace se provádí po zhotovení vinutí statoru nebo rotoru, případně impregnujeme navinuté cívky. Impregnační laky mají zasychat v celé vrstvě nejen na povrchu, nemají měknout při vyšších teplotách (80 – 100°C). Impregnace si mají podržet své mechanické a elektrické vlastnosti co nejdéle.

Technologický postup jednotlivých operací:

- **vysoušení vinutí**

podle podmínek odstraňujeme vlhkost v sušící peci při teplotě 90 - 100°C. Po vysoušení vinutí musí být izolační odpor R_{iz} proti kostře stroje větší než 5 MΩ.

- **impregnování**

po vychladnutí asi na 30° C, provádíme namáčení statorů a rotorů v nádržích s impregnačním lakem. Ponoření trvá tak dlouho, dokud nepřestanou unikat vzduchové bubliny, pak je zaručeno, že lak zatekl všude. Doporučuje se stator nebo rotor nejprve ohřát na teplotu 40 - 50°C dochází tak k lepšímu vnikání laku do vinutí. Můžeme také přidat předepsané ředidlo v množství cca 50 %. Avšak ředění laku usnadňuje sice vnikání laku do vinutí a jeho vytvrzování, podstatně však snižuje izolační účinek a elasticitu. Při impregnaci hustě vinutého vinutí se dává přednost vakuotlaké impregnaci v autoklávu. Vakuum bývá na začátku 72 kPa po dobu jedné hodiny, pak se zvedne tlak na 200 kPa opět po dobu jedné hodiny. Laky při tom polymerují nebo oxidují popřípadě oba procesy současně.

- **vytvrzování laku**

po odpaření rozpouštědel se lak vytvrzuje 12-24 hodin při teplotě 125-130°C. Podle druhu laku se volí teplota v impregnační peci. Vytvrzení končí, dosáhne-li stroj při teplotě 95°C izolačního odporu R_{iz} 20 MΩ. Vinutí, na které jsou kladeny normální požadavky, se obvykle impregnuje jednou a opatřuje se jednoduchým povrchovým nátěrem. Vinutí, které je vystaveno vlivům vysoké vlhkosti, potřebuje nejméně dvojnásobnou impregnaci a dva až tři povrchové nátěry.

Impregnační laky jsou na bázi polyesterů nebo polyesterimidů a jsou buď rozpouštědlové, nebo bezrozpouštědlové. Vybrané druhy impregnačních laků:

- **lak syntetický impregnační S 1901**

skládá se z roztoku alkydové a fenolické pryskyřice v organických rozpouštědlech. Používá se pro impregnaci vinutí točivých strojů, transformátorových cívek a přístrojů. Osvědčuje se i k impregnaci vinutí trakčních motorů, transformátorů, báňských motorů, malých motorků i slaboproudých zařízení. Je odolný proti chemickým výparům, vodě, vlhku a horkému transformátorovému oleji. Vzhledem k složení rozpouštědel je vhodný k impregnaci vinutí sklem opředených vodičů a lakovaných drátů s izolací třídy E a B. Nenapadá vodiče lakované polyamidovými, polyvinylformalovými, polytereftalovými, polyureta-novými a polyesterimidovými laky. Nanášení se máčením nebo vakuovou impregnací. Jako ředidlo se používá S 6900 popřípadě S 6006.

- **lak povrchový elektroizolační S 1903**

patří do tepelné izolační třídy F, skládá se z roztoku epoxysterového pojiva v organických rozpouštědlech. Používá se na lakování plošných spojů pro aplikaci do minus 60°C, jako izolační a montážní lak pro trafoplechy nebo k impregnaci malých elektromotorů bez vypalování. Nanáší se máčením nebo vakuotlakou impregnací.

- **lak syntetický impregnační S 1942**

patří do tepelné izolační třídy F, skládá se z roztoku modifikovaného izokyanurátu a fenolformaldehydové pryskyřice ve směsi organických rozpouštědel. Používá se k impregnaci se sklem opředených vodičů a lakovaných drátů s izolací třídy F všemi běžnými způsoby. Nejběžnější je vakuotlaková impregnace. Nenapadá vodiče, lakované polyamidovými, polyvinylformalovými, tereftalovými, polyesterimidovými a polyuretanivými nátěrovými hmotami. Ředí se ředidlem S 6904.

- **Impregnanty NH 91 a NH 91 LV**

jsou jednosložkové impregnanty na bázi modifikované nenasycené polyesterové pryskyřice rozpustné v diallylftalátě. Vytvrzují se 3 – 5 hodin při 135 – 150 °C od dosažení příslušné teploty ve vinutí. Impregnanty jsou odolné vůči freonům, transformátorovým olejům a radioaktivnímu záření. Jsou určeny na impregnaci vinutí vysoko mechanicky a tepelně namáhaných elektrických točivých strojů a transformátorů tepelné třídy H (180°C) diskontinuální technologií namáčením nebo zaplavitím za atmosférického tlaku nebo ve vakuu a tlaku. Jako ředidlo se používá stabilizátor ZV 91.

- **zakupávací impregnant NHZ 94**

je roztok modifikované nenasycené polyesterové pryskyřice v diallylftalátě. Před zpracováním se musí smíchat s iniciátorem Z 83 v hmotnostním poměru 100:2. Vyznačuje se krátkým časovým vytvrzením

při 150 °C. Jím impregnované vinutí má velmi dobré mechanické zpevnění, odolnost vůči páráům rozpouštědel, transformátorovým olejům, freonům a radioaktivnímu záření. Je určený na impregnaci zakapávaním mechanicky a teplotně vysoko namáhaných vinutí alternátorů a rychlootáčkových elektrických točivých strojů pro domácí spotřebiče a ruční nářadí teplotní třídy H.

- **polyuretanové zalévací látky Vukol 022,033**

jsou dvousložkové. Skládají se z polyolové složky Vukol a z tvrdidla Vukit M, které se míchají v předepsaném poměru. Zpracovávají se a vytvrzují při teplotách nad 5°C. Neobsahují rozpouštědla ani jiné prchavé látky. Jejich vytvrzování je charakterizované nízkou exotermní teplotou. Po vytvrzení se vyznačují pružností tvrdé gumy. Slouží k vyplňování dutin veškerého druhu, speciálně při stavbě elektrických zařízení, kde se požadují zalévací látky bez vnitřního pnutí dobrých elastických a elektroizolačních vlastností. Mají dobrou přilnavost k PVC a gumě. Slouží k zalévání transformátorů, elektrických součástek do krytu, kabelových koncovek a spojek, za účelem zamezení jejich navlhnutí. V důsledku vysoké tažnosti snášejí teplotně dilační namáhání a je s nimi možné zalévat látky s různou tepelnou roztažností. Snášejí trvalé zatížení do teploty 120°C - 130°C.



Obr. č. 12. Vakuotlaké impregnační zařízení

2.2.4. Prokládání čel vinutí a jejich bandáž a uzávěry drážek elektromotorů

• Prokládání čel vinutí izolačními podložkami

Po navinutí statoru, nebo rotoru je potřeba izolovat cívkové skupiny, které patří různým fázím. Z materiálů drážkových izolací nastříháme tvarové izolace, které musí přesahovat jednotlivé cívkové skupiny, aby byly izolovány jednotlivé fáze. Vadné nebo nedokonalé založení izolace v čelech může zavinit průraz mezi různými fázemi a tím i zničení vinutí.

• Bandáž čel vinutí

Bandáž provádíme s ohledem na uspořádání vinutí. Bandáží musí být vinutí dobře staženo, aby bylo tuhé a pevné. Každé vinutí rotoru, kromě klecového vinutí, je třeba zajistit bandáží. Podle druhu a způsobu provedení vinutí zhotovujeme bandáž provázkem, skelnou izolační páskou nebo izolačními dráty na podložkách. Bandáž lakovanou páskou zhotovujeme hlavně pro zpevnění a izolování čel vinutí asynchronních motorů. V současné době se k bandážování čel používá široký výběr pásek a tkanic. Uvedeme několik používaných typů:

- Polyglas - páska ze skelných vláken impregnovaná syntetickou pryskyřicí, vyrábí se podle tepelných tříd 155(F), 180(H), 220.
- Polyesterová tkanice - tepelná třída 155 (F), vazba kepr nebo plátno
- Skelná tkanice – tepelná třída 180 (H), vazba plátno

• Drážkové uzávěry

Slouží k zábraně vypadnutí statorových nebo rotorových vinutí z drážek a následnému poškození, zejména u kroužkových rotorů působením odstředivé síly. Po vložení vinutí do drážek se tyto uzávěry zaklínují. Drážkové uzávěry mohou být z různých materiálů:

- sušené bukové dřevo, skloepoxid, sklolaminát, sklotextit.

Dodávají se v těchto profilech:

- půlkruhové, lichoběžníkové a kulaté.

3. Izolační materiály pro motory nízkého napětí

Izolační materiály používané v elektrických strojích jsou převážně pevného skupenství. Izolace musí mít potřebné izolační vlastnosti a musí umožňovat mechanizaci a automatizaci technologických procesů při výrobě. Izolace do značné míry určují kvalitu elektrického stroje. Tloušťkou mezi závitové a drážkové izolace se dají regulovat rozměry a hmotnost stroje. Oteplením izolací dochází ke stárnutí a následnému zhoršení izolačních vlastností a mechanických pevností. Tímto je limitována i životnost elektrického stroje. Základem pro klasifikaci izolace je tepelná stálost, což je schopnost izolačního materiálu plnit své funkce při provozní teplotě po dobu srovnatelnou s uvažovanou dobou nasazení stroje.

3.1. Rozdělení elektroizolačních materiálů do tepelných tříd.

Podle normy ČSN EN 60085 dělíme elektroizolační materiály do teplotních tříd podle doporučených hodnot mezních teplot ve stupních Celsia:

- **Třída 90 (Y)**

Charakteristika základních skupin materiálů – Izolace se skládá z neimpregnovaných látek, jako je papír. Jiné látky nebo kombinace mohou být zařazeny do této třídy, dá-li se ze zkušeností nebo uznanými zkouškami dokázat, že mohou v provozu snášet teploty třídy Y.

- **Izolační materiály**

Hlavní materiály jsou vlákniny z regenerované celulózy, polyamidové vlákniny, papír a papírové výrobky, lesklá lepenka, anilinformaldehydové a močovinoformaldehydové pryskyřice. Vedlejší materiály jsou polyakryláty, polyetylén, polystyren (teplotou tuhnutí mohou být omezené pod 90 °C), polyvinylchlorid měkčený nebo neměkčený a vulkanizáty z přírodního kaučuku.

- **Třída 105 (A)**

Charakteristika základních skupin materiálů – Izolace se skládá z látek jako je papír nebo papírových kombinací vhodně impregnovaných, lakovaných nebo ponořených do izolační kapaliny jako je např. olej. Jiné látky nebo jejich kombinace mohou být zařazeny do této třídy, dá-li se ze zkušeností nebo uznanými zkouškami že mohou v provozu snášet teploty třídy A.

- **Izolační materiály**

Hlavní materiály jsou vlákniny z regenerované celulózy a z acetátu celulózy, polyamidové vlákniny, papír a papírové výrobky, lesklá lepenka, uvedené hmoty impregnované nebo ponořené v tekutém dielektriku, lakované tkaniny z regenerované celulózy nebo polyamidů; lakovaný papír. Vedlejších materiály jsou polychloroprenové elastomery a butadien – akrylonitrilové elastomery.

- **Pojidla, impregnanty, povlaky:**

Pro výrobu hmot to jsou vysychavé laky ze syntetických pryskyřic modifikovaných olejem, fenoltormaldehydové pryskyřice.

- **Třída 120 (E)**

Charakteristika základních skupin materiálů – izolace se skládá z látek nebo jejich kombinací, u kterých lze ze zkušeností nebo uznanými zkouškami dokázat, že jsou v provozu schopné snášet teploty třídy E (látky s tepelnou stálostí dovolující provoz při teplotě o 15 °C vyšší, než je teplota látky náležející do třídy A).

- **Izolační materiály**

Vedlejší materiály jsou laky na dráty z polyvinylformálových, polyuretanových a epoxidových pryskyřic, výlisky s celulózovým pojivem, tvrzený papír, zasítované polyesterové pryskyřice, fólie z triacetátu celulózy, fólie z polyethylentereftalátu, vlákniny z polyethylentereftalátu a lakované tkaniny polyethylentereftalátové.

- **Pojidla, impregnanty, povlaky**

Pro výrobu hmot to jsou olejem modifikované laky z alkydových pryskyřic. Pro úpravu izolací to jsou olejem modifikované laky ze syntetických pryskyřic, zasítované polyesterové a epoxidové pryskyřice.

- **Třída 130 (B)**

Charakteristika základních skupin materiálů – izolace se skládá z látek jako slída, skelné vlákniny apod. nebo z jejich kombinací s vhodnými pojivy. Jiné látky mimo uvedené kombinace (nemusí být nutně anorganické), mohou být zařazeny do této třídy, dá-li se ze zkušeností nebo uznanými zkouškami dokázat, že mohou v provozu snášet teplotu třídy B.

- **Izolační materiály**

Hlavní materiály jsou skelné vlákniny, lakované tkaniny ze skelných vláken, vrstvená listková slída, vrstvené skelné tkaniny a výlisky s minerálním plnivem. Vedlejší materiály jsou výlisky s minerálním plnivem, polytrifluorchloretylen a laky na dráty z polyethylentereftalátu.

- **Pojidla, impregnanty, povlaky**

Pro výrobu hmot to jsou olejem modifikované látky ze syntetických pryskyřic, bitumenová pojidla, olejem modifikované syntetické pryskyřice, alkydové pryskyřice, zasítované polyesterové pryskyřice, epoxidové pryskyřice, melanin-formaldehydové pryskyřice, fenol-formaldehydové pryskyřice a epoxidové pryskyřice. Pro úpravu izolací to jsou olejem modifikované syntetické pryskyřice a zasítované polyesterové pryskyřice (při velkém mechanickém namáhání mohou být tyto látky nevhodné a může se objevit potřeba nemodifikovaných fenolových pryskyřic).

- **Třída 155 (F)**

Charakteristika základních skupin materiálů – izolace se skládá z látek jako je slída, skleněné vlákniny nebo jejich kombinací s vhodnými pojivy i z látek, které nemusí být anorganické nebo jejich kombinací, při kterých lze ze zkušeností nebo uznanými zkouškami dokázat, že mohou v provozu snášet teplotu třídy F (hmoty s tepelnou stálostí dovolující provoz při teplotě o 25 °C vyšší, než je teplota pro hmoty třídy B).

- **Izolační materiály**

Vedlejší materiály jsou skelné vlákniny, lakované skelné tkaniny a vrstvená lístková slída.

- **Pojidla, impregnantry, povlaky**

Pro výrobu hmot to jsou alkydové epoxidové, polyuretanové zasít'ované pryskyřice s větší tepelnou stálostí a silikonalkydové pryskyřice. Pro úpravu izolací to jsou alkydové epoxidové pryskyřice, polyuretanové a zasít'ované pryskyřice s větší tepelnou stálostí, silikonalkydové a silikonfenolové pryskyřice.

- **Třída 180 (H)**

Charakteristika základních skupin materiálů odpovídajících dané teplotní třídě – izolace se skládá z látek, jako silikonové elastomery, z kombinace látek jako slída, skelná vlákna s vhodnými pojidly (některé silikonové pryskyřice). Jiné látky nebo jejich kombinace mohou být zařazeny do této třídy, lze-li ze zkušenosti nebo uznanými zkouškami dokázat, že mohou v provozu snášet teploty třídy H..

- **Izolační materiály**

Hlavní materiály jsou skelné vlákniny, lakované skelné vlákniny, vrstvená lístková slída, vrstvené skelné tkaniny a silikonové elastomery.

- **Pojidla, impregnantry, povlaky**

Pro výrobu hmot to jsou vhodné silikonové pryskyřice a silikonové elastomery. Pro úpravu izolací to jsou vhodné silikonové pryskyřice.

- **Třída 200 (N)**

Charakteristika základních skupin materiálů odpovídajících dané teplotní třídě – izolace se skládá z látek jako slída, porcelán, sklo a křemen.

- **Izolační materiály**

Hlavní materiály jsou slída, sklo, křemen, porcelán a jiné keramiky. Vedlejší materiály jsou impregnované skelné tkaniny, vrstvená lístková slída, lisovací hmoty anorganické a polytetrafluoretylén.

- **Pojidla, impregnaty, povlaky**

Pro výrobu hmot to jsou silikonové pryskyřice s vyšší tepelnou stálostí a anorganická pojiva. Pro úpravu izolace to jsou anorganická pojidla jako sklo, cement a silikonové pryskyřice s vyšší tepelnou stálostí.

Podle požadavků se uvádí do závorky za označením tepelné třídy písemné označení, pokud je omezený prostor pro značení jako například na štítcích malých elektromotorů lze zvolit pouze písemné označení.

3.2. Izolační materiály používané pro motory nízkého napětí.

- **Elektrotechnické papíry a lepenky**

Vyrábějí se z chemicky zpracovaných vláken, dřevoviny a bavlny, jsou určeny pro práci ve vzduchu nebo oleji. Elektroizolační papír se dodává ve svitcích, lepenky buď ve svitcích, nebo v deskách.

- **Vrstvené izolační materiály**

K těmto materiálům patří sklotextid. Jako pojidla se při jejich výrobě používají tkaniny ze skelných vláken. Největší tepelnou odolnost a dobré elektroizolační vlastnosti má sklotextit se silikonovými plnidly.

- **Impregnační laky**

Používají se pro impregnaci vinutí elektrických strojů, zároveň zpevňují vinutí a zvětšují tepelnou vodivost a odolnost vinutí proti vlhkosti. Krycí laky zajišťují odolnost vinutí proti vlhkosti, proti působení oleje, ochranu proti působení agresivních látek na vinutí a na ostatní části elektrických strojů. Podle způsobu vysoušení a vytvrzování se laky dělí na laky vytvrzované za studena a laky vytvrzované za tepla. První se vytvrzují při normální pokojové teplotě a druhé při teplotách 80 °C až 180 °C.

- **Lakované tkaniny**

Jejich základ tvoří tkanina napuštěná lakem nebo jiným kapalným izolačním materiálem. Lakované tkaniny se dělí na, kapronové a skleněné. Ohebnější jsou kapronové tkaniny. Skleněné lakované tkaniny jsou méně ohebné. Tvrdé lakované tkaniny se používají na zhotovení drážkové izolace a izolace mezi vinutími, skelné tkaniny jsou nehořlavé, chemicky stálé a mohou pracovat při teplotě 250 °C. Lakované tkaniny zajišťují homogennost mnohovrstvé izolace vinutí.

- **Izolační fólie**

Jejich malá tloušťka (10 – 200 μm) vede k lepšímu využití drážek a důsledkem toho je zmenšení hmotnosti elektrického stroje na jednotku výkonu.

- **Předimpregnované izolační materiály**

Jsou na bázi slídy, uplatňují se ve všech druzích elektrických motorů. Do této kategorie izolačních materiálů patří mikafólium a mikapásky. Kumutátorový mikanit slouží k izolaci mezi jednotlivými lamelami komutátorů. Mikafólium je tvořeno vrstvami šupinek štípané slídy, které jsou slepeny navzájem a rovněž k vrstvě papíru nebo skelné tkaniny. Sklomikanity jsou materiály různorodého sortimentu mikapásek. Speciální skelné pásy sloužící k bandáži vinutí.

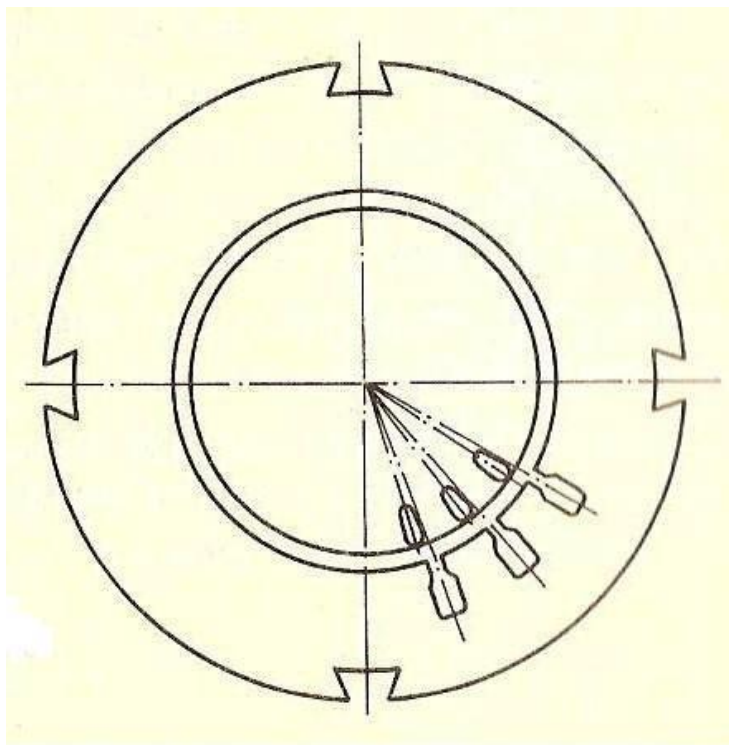
4. Izolační systém magnetického obvodu motoru.

Magnetický obvod je cesta, po které se uzavírá magnetický tok. Magnetické obvody se skládají feromagnetických materiálů, protože mají permeabilitu mnohonásobně větší než je permeabilita diamagnetických nebo paramagnetických materiálů. Feromagnetické materiály tvoří jádra, které upravují cestu magnetickému toku, tato cesta by mohla být různá, protože magnetické pole prostupuje téměř každým prostředím.

Statorové magnetické obvody střídavých motorů, jsou uloženy v tenkostěnných litinových a hliníkových kostrách nebo v kostrách svařovaných z ocelových plechů. Magnetický obvod je ze svazku elektrotechnických plechů ve tvaru dutého válce. Výlisky jsou z plechů o tloušťce 0,5 mm. Na jedné straně jsou pokryty izolační vrstvou.

Rotorové magnetické obvody jsou rovněž z elektrotechnických plechů. Svazek plechů se také nazývá paket a je buď nalisován na vroubkovanou hřídel, anebo je s hřídelem spojen na drážku a péro. U velkých motorů jsou na hřídel přivařeny trámce a teprve na nich je uložen svazek plechů. U pomaloběžných motorů o velkém průměru rotoru je na hřídeli upevněná litá hvězdice, která nese rotorové plechy.

Magnetické obvody elektrických motorů se vyrábějí s tenkých ocelových elektrotechnických plechů nebo z lité oceli na odlitky či z litiny. Tenké plechy se vyrábějí pokud možno z čisté oceli, zkujňované martinských pecích z elektrooceli vyrobené v elektrických obloukových pecích. Některé plechy se válcují pouze za tepla, u jiných se kombinuje válcování za tepla a za studena.



Obr. č. 13. Výsek plechu statoru a rotoru [6]

4.1. Značení a rozdělení elektrotechnických plechů a pásů

Označení izotropních a anizotropních elektrotechnických plechů odpovídá normě EN 10027 – 1.

Pořadí označení plechů a pásů pro elektrotechniku je následující:

- velké písmeno M značíme plechy a pásy pro elektrotechniku.
- stonásobek maximálních měrných ztrát ve wattech na kilogram při:
 - magnetické indukci 1,5T a frekvenci 50 Hz, pro izotropní plechy nebo pásy.
 - magnetické indukci 1,7T a frekvenci 50 Hz, pro anizotropní plechy nebo pásy.
- stonásobek jmenovité tloušťky v mm.
 - jmenovité řady izotropních plechů nebo pásů jsou 0,35mm, 0,50mm, 0,65mm, 1,00mm.
 - jmenovité řady anizotropních plechů nebo pásů jsou 0,23mm, 0,27mm, 0,3mm, 0,35mm.
- podle charakteristického písmena
 - A - pro izotropní plechy nebo pásy
 - D – nelegované plechy nebo pásy, bez závěrečného žíhání
 - E – legované plechy nebo pásy, bez závěrečného žíhání
 - S - pro běžné anizotropní výrobky
 - P - pro anizotropní výrobky s vysokou permeabilitou.

Rozdělení elektrotechnických plechů podle vnitřní struktury a druhu válcování:

- **Izotropní plechy**

Starší označení Ei. Tato skupina elektrotechnických plechů se také často nazývá se slabou anizotropií, ale při tolerantním pohledu ji můžeme považovat za izotropní. Vyrábí se v pásech, obsahují 0,5 až 3,5 % křemíku a mají ztrátové číslo v rozmezí 1,1 až 3,6 W/kg. Pojem slabá anizotropie se dá objasnit rozdílem ve velikosti měrných magnetických ztrát, udávaných ve W/kg, měřených ve směru válcování pásu a ve směru kolmém. Ztráty ve směru kolmém jsou větší cca jen o 30 %. Izotropní elektrotechnické pásy mají přibližně univerzální použití. Díky způsobu výroby mají pásy hladký povrch a tloušťku pohybující se jen v malých tolerancích, což obojí je důležité pro sestavování kvalitních magnetických obvodů. Nejvíce se používají při výrobě malých elektromotorů a elektromotorků.

- **Anizotropní plechy s krystalografickou texturou**

Podle objevitele N. P. Gosse se také nazývají s Gossovou texturou. Starší označení Eo. Jsou válcované s minimálními ztrátami, ale s rozdílnými magnetickými vlastnostmi ve směru válcování a ve směru kolmém na válcování, jsou vyráběny náročným technologickým procesem, jehož hlavním cílem je dosažení snadné magnetizace materiálu alespoň v jednom směru. Tento směr je shodný se směrem válcování. V tomto směru klesnou měrné magnetické ztráty až na 0,4 W/kg, zvýší se indukce a permeabilita. Materiál, který má výrazně lepší vlastnosti v jednom směru než ve směrech ostatních, nemůže mít univerzální využití. Proto se tyto válcované pásy používají hlavně pro výrobu velkých transformátorů nebo pro výrobu prstencových jader menších i dokonce malých průřezů, jejichž magnetický obvod je sestaven jen z plechů obdélníkového tvaru. Takový plech se může z pásu vystříhnout tak, aby délka obdélníka byla rovnoběžná se směrem válcování.

4.2. Izolace plechů pro elektrotechniku

Časově proměnný magnetický tok by způsobil v plném materiálu značné ztráty vířivými proudy. Část energie, kterou dodáme na magnetování materiálu, se mění ve ztrátovou tepelnou energii. Nepříznivé účinky vířivých proudů omezujeme zvětšením ohmického odporu magnetického materiálu a složením magnetického obvodu z navzájem izolovaných plechů tak, aby průřez magnetického obvodu v rovině kolmé ke směru magnetické indukce byl rozdělen na malé plošky. Izolace plechů se provádí jednostranným polepováním papírem, lakováním, oxidováním (Fe_3O_4) a fosfátováním (Kerizol), nebo speciálními nátěry.

Požadavky na izolaci:

velký elektrický odpor, malá tloušťka izolační vrstvy (činitel plnění), velká tepelná odolnost, odolnost vůči chemikáliím, odolnost proti navlhování a korozi, dobrá opracovatelnost při ražení a stříhání

Izolační laky používané k izolování dynamových plechů rozdělujeme podle původu:

- organické izolační laky – Sulfizol, Remizol EB 5014 HF.
- anorganická izolační laky – Voltatex E 1120.
- anorganické – organické izolační laky - Remisol EB 5308 K, Remisol EB 5350.

5. Návrh izolačního systému elektrického obvodu vybraného elektromotoru

5.1. Popis a parametry elektromotoru

Štítkové a tabulkové hodnoty:

Typ: 4AP80 – 4 IM3081

Výrobce: MEZ Mohelnice

Krytí: IP 54

Zatížení: S1 – Trvalé zatížení

Napětí: $U_y/U_\Delta = 380/220$ V

Proud: $I_y/I_\Delta = 2/3,45$ A

Výkon: $P_2 = 750$ W

Účinnost: $\cos\varphi = 0,79$

Naměřené hodnoty:

Stator motoru

Vnější průměr statorového svazku: $D_e = 116$ mm

Vnitřní průměr statorového svazku: $D = 70$ mm

Délka statorového svazku: $l = 74$ mm

Frekvence: $f = 50$ Hz

Počet otáček: $n = 1380$ min⁻¹

Počet pólů: $2p = 4$

Počet fází: $m=3$

Počet vodičů v drážce: $N_d = 103$ vodičů

Průměr vodiče: $d = 0,56$ mm

Počet drážek: $Q_1 = 24$

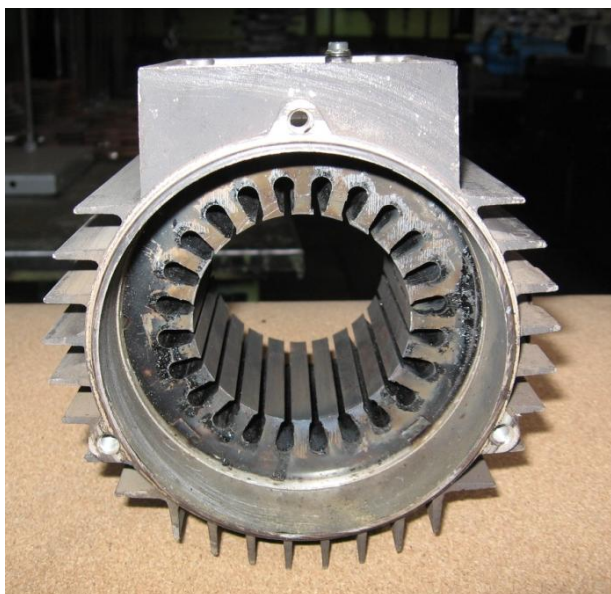
Typ drážky: S

Rotor motoru

Vnější průměr rotorového svazku: $d = 69,6$ mm

Vnitřní průměr rotorového svazku: $d_i = 24$ mm

Délka rotorového svazku: $l = 74$ mm



Obr. č. 14. Rotor nakrátko motoru 4AP80 – 4
(nahore)

Obr. č. 15. Statorový svazek v kostře motoru
4AP80 – 4 (vlevo)

5.2. Přepočet vinutí na jiné napětí, volba vodiče

Nové hodnoty napětí $U'_y/U'_\Delta = 400/231 \text{ V}$

Přepočítávací činitel pro zapojení do hvězdy K'_{uy} a trojúhelníku $K'_{u\Delta}$:

$$K_{uy} = \frac{U'_y}{U_y} = \frac{400}{380} = 1,053 \qquad K_{u\Delta} = \frac{U'_\Delta}{U_\Delta} = \frac{231}{220} = 1,053$$

Přepočtený jmenovitý proud při zapojení do hvězdy $I'_y \text{ (A)}$ a trojúhelníku $I'_\Delta \text{ (A)}$:

$$I'_y = \frac{I_y}{K_{uy}} = \frac{2}{1,053} = 1,9 \text{ A} \qquad I'_\Delta = \frac{I_\Delta}{K_{u\Delta}} = \frac{3,45}{1,053} = 3,3 \text{ A}$$

Nový počet vodičů v drážce N'_d :

$$N'_d = N_d \cdot K_{uy} = 103 \cdot 1,053 = 108 \text{ závitů}$$

Průměr nového vodiče $d' \text{ (mm)}$:

$$d' = \frac{d}{\sqrt{K_{uy}}} = \frac{0,56}{\sqrt{1,053}} = 0,55 \text{ mm}$$

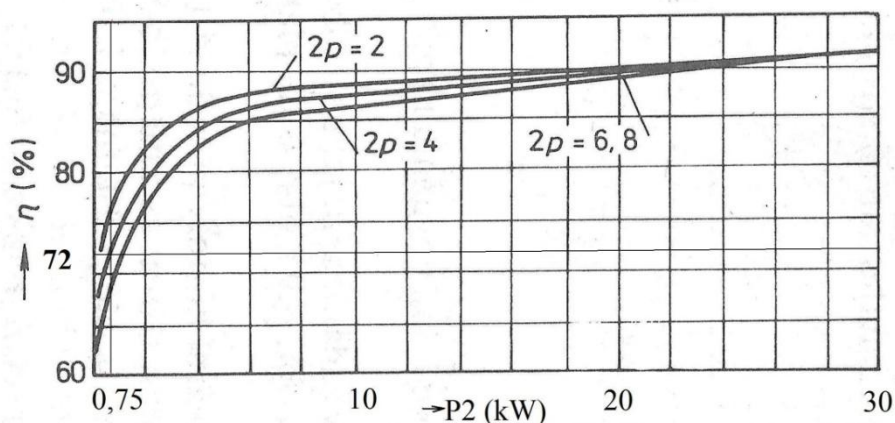
Podle tabulky v přílohách č. 2 a 3, jsem zvolil nejbližší větší průměr lakovaného drátu $d = 0,56 \text{ mm}$.

Drát V155 je lakovaný polyuretanem. Teplotní třídy 155 (F). Maximální přírůstek izolace ve druhém stupni je $0,047 \text{ mm}$. Vnější průměr vodiče ve druhém stupni lakování bude $d_{iz2} = 0,630 \text{ mm}$.

Průřez nového vodiče $S \text{ (mm}^2\text{)}$:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,56^2}{4} = 0,25 \text{ mm}^2$$

Přibližná účinnost motoru η určená z obrázku č. 16. je 72 %



Obr. č. 16. Přibližné hodnoty účinnosti asynchronního motoru řady 4AP do 30 kW

Příkon motoru P_1 (W):

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{750 \cdot 100}{72} = 1042 \text{ W}$$

Proud ve vodiči vinutí při zapojení do hvězdy I_1 (A):

$$I_1 = \frac{P_1}{3 \cdot U_f \cdot \cos \varphi} = \frac{1042}{3 \cdot 231 \cdot 0,79} = 1,9 \text{ A}$$

Proudová hustota vodiče σ ($\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$):

$$\sigma = \frac{I_1}{S} = \frac{1,9}{0,25} = 7,73 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Počet drážek na fázi a pól q :

$$q = \frac{Q_1}{2p \cdot m} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$$

Krok vinutí y :

$$y = \frac{Q_1}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

Počet závitů v jedné fázi N_1 :

$$N_1 = N_d \cdot q \cdot 2 = 108 \cdot 2 \cdot 2 = 432 \text{ závitů}$$

Magnetický tok ϕ (Wb):

$$\phi = \frac{U_f}{4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot k_v} = \frac{231}{4,44 \cdot 432 \cdot 50 \cdot 1} = 24 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Činitel vinutí pro jednovrstvové vinutí asynchronních motorů: $K_v = 1$

Magnetická indukce B (T) :

$$B = \frac{\phi \cdot p}{D \cdot l} = \frac{24 \cdot 10^{-3} \cdot 2}{70 \cdot 10^{-3} \cdot 74 \cdot 10^{-3}} = 0,93 \text{ T}$$

5.3. Návrh drážkové izolace, výpočet činitele plnění drážky

Změřené a doplněné hodnoty rozměrů drážky S podle tabulky v příloze č. 3:

$$b_0 = 2,5 \text{ mm}$$

$$h_0 = 0,5 \text{ mm}$$

$$h_2 = 10 \text{ mm}$$

$$b_1 = 5,2 \text{ mm}$$

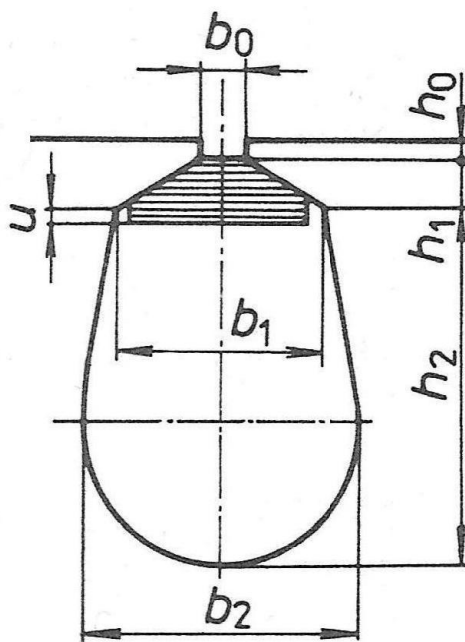
$$h_1 = 1,35 \text{ mm}$$

$$u = 1,1 \text{ mm}$$

Výpočet zbývajícího rozměru b_2 drážky S (mm) zaokrouhlený na 0,1 mm dolů:

$$b_2 = \frac{b_1 \cdot \cos \cdot \frac{180^\circ}{Q_1} + 2 \cdot h_2 \cdot \sin \cdot \frac{180^\circ}{Q_1}}{1 + \sin \cdot \frac{180^\circ}{Q_1}} = \frac{5,2 \cdot \cos \cdot \frac{180^\circ}{24} + 2 \cdot 10 \cdot \sin \cdot \frac{180^\circ}{24}}{1 + \sin \cdot \frac{180^\circ}{24}} = 6,8 \text{ mm}$$

Zápis drážky: S 5,2 x 10



Obr. č. 17. Rozměry drážky typu S [1]

Výpočet plochy drážky:

Výpočet výšky lichoběžníku h_l (mm):

$$h_l = h_2 - \frac{b_2}{2} = 10 - \frac{6,8}{2} = 6,6 \text{ mm}$$

Plocha lichoběžníku S_l (mm²):

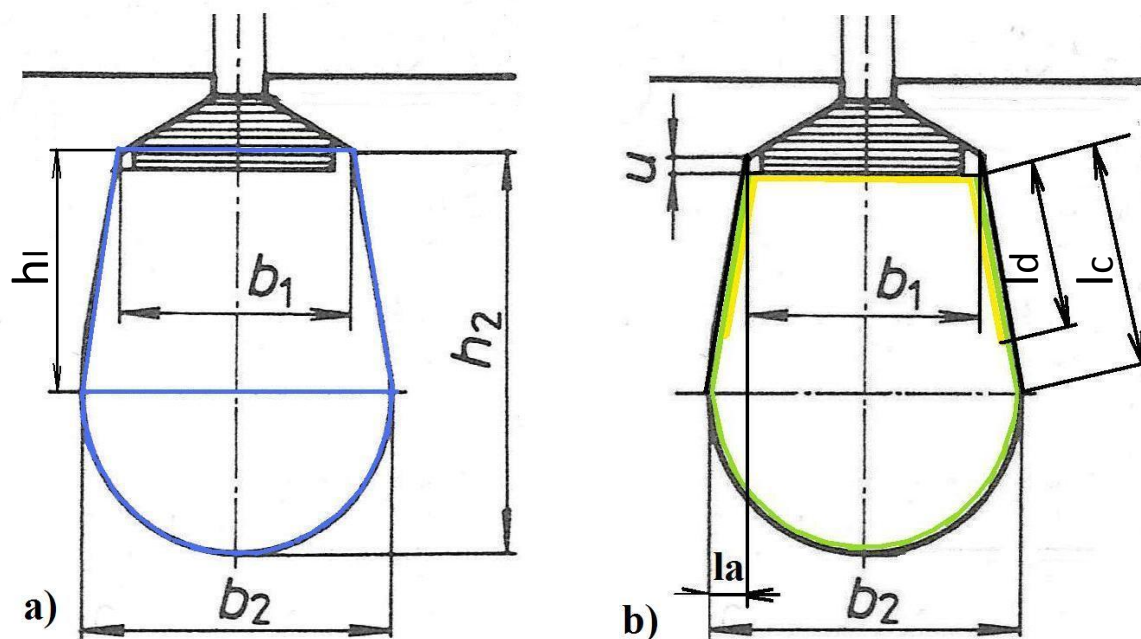
$$S_l = \frac{(b_1 + b_2) \cdot h_l}{2} = \frac{(5,2 + 6,8) \cdot 6,6}{2} = 39,6 \text{ mm}^2$$

Plocha půlkruhu S_{pk} (mm²):

$$S_{pk} = \frac{\pi \cdot b_2^2}{2} = \frac{\pi \cdot 6,8^2}{2} = 18,16 \text{ mm}^2$$

Hrubá plocha drážky S_{hd} (mm²):

$$S_{hd} = S_l + S_{pk} = 39,6 + 18,16 = 57,76 \text{ mm}^2$$



Obr. č. 18. Informativní obrázky k výpočtům a) plochy drážky S b) Plochy drážkové izolace v drážce typu S

Návrh drážkové izolace:

Zvolíme drážkovou izolaci typu NEN – F, tloušťky $t_{iz}=250 \mu\text{m}$, podle tabulky č. 1. Použijeme ji na vyložení dna drážky a jako krycí vložku pod klín.

Tabulka č. 1. s parametry drážkových izolací NEN – F

NEN - F		
Jmenovitá tloušťka	Tloušťka rohože	Tloušťka fólie
μm	μm	μm
200	60	75
250	60	125
300	100	75
300	60	190
400	100	250
450	100	250

Strany pravoúhlého trojúhelníku pro výpočet plochy drážkové izolace l_a (mm) a l_c (mm):

$$l_a = \frac{(b_2 - b_1)}{2} = \frac{(6,8 - 5,2)}{2} = 0,8 \text{ mm} \qquad l_c = \left(\sqrt{l_a^2 + h_l^2} \right) = \left(\sqrt{0,8^2 + 6,6^2} \right) = 6,65 \text{ mm}$$

Délka půlkruhu drážkové izolace l_{pk} (mm):

$$l_{pk} = \frac{\pi \cdot b_2}{2} = \frac{\pi \cdot 6,8}{2} = 10,68 \text{ mm}$$

Délka drážkové izolace na vyložení drážky l_{iz1} (mm):

$$l_{iz1} = 2 \cdot l_c + l_{pk} = 2 \cdot 6,65 + 10,68 = 23,98 \text{ mm}$$

Délku ohybu dovnitř drážky krycí vložky zvolíme $l_d = 5 \text{ mm}$

Délka drážkové krycí vložky pod klín l_{iz2} (mm):

$$l_{iz2} = b_1 + 2 \cdot l_d = 5,2 + 2 \cdot 5 = 15,2 \text{ mm}$$

Celková plocha obou drážkových izolací S_{iz} (mm²):

$$S_{iz} = t_{iz} \cdot (l_{iz1} + l_{iz2}) = 0,25 \cdot (23,98 + 15,2) = 9,79 \text{ mm}^2$$

Činná plocha drážky $S_{\check{c}d}$ (mm²):

$$S_{\check{c}d} = S_{hd} - S_{iz} = 57,76 - 9,79 = 47,96 \text{ mm}^2$$

Plocha drátů v drážce S_{dd} (mm²):

$$S_{dd} = N'_d \cdot \frac{\pi \cdot d_{iz2}^2}{4} = 108 \cdot \frac{\pi \cdot 0,63^2}{4} = 33,8 \text{ mm}^2$$

Činitel plnění drážky k_{dr} :

$$k_{dr} = \frac{S_{dd}}{S_{\check{c}d}} = \frac{33,8}{47,96} = 0,7$$

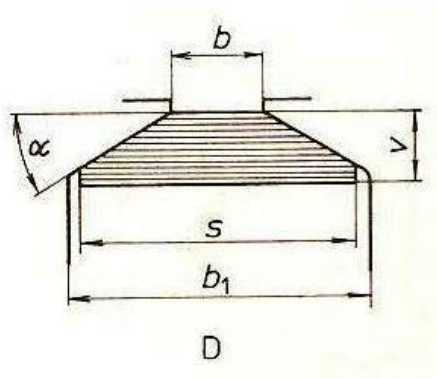
5.4. Návrh ostatních částí izolačního systému elektromotoru:

Drážkový uzávěr:

Pro drážku tvaru S použijeme drážkový uzávěr tvaru D. Jeho rozměry jsou v přílohách 5 a 6.

Rozměry drážkového uzávěru tvaru D:

$$\begin{array}{lll} b_1 = 5,2 \text{ mm} & s = 5 \text{ mm} & \alpha = 45^\circ \\ b = 3 \text{ mm} & v = 2,5 & \end{array}$$



Obr. č. 19. Rozměry drážkového klínu tvaru D [1]

Izolace na prokládání čel vinutí:

Jako fázovou izolaci v čelech použijeme stejnou izolaci jako drážky NEN-F, tloušťky $t_{iz}=250\text{ }\mu\text{m}$, podle tabulky č. 1.

Bandáž vinutí:

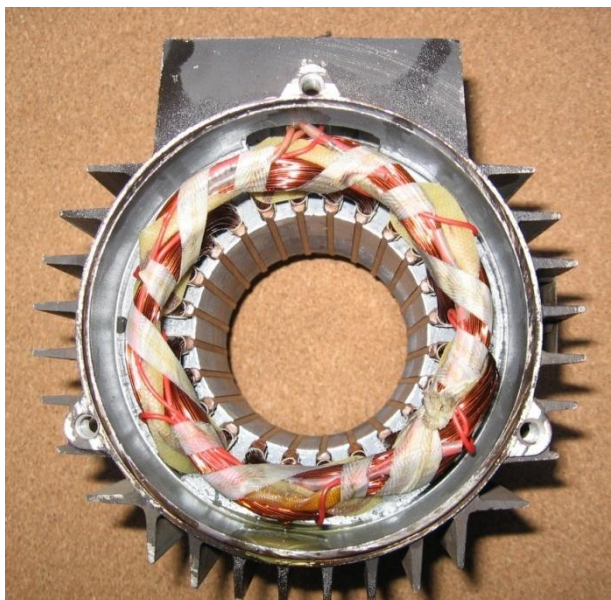
Bandáž čel vinutí provedeme, páskou ze skelných vláken impregnovaná syntetickou pryskyřicí - Polyglas, tepelné třídy 155 (F)

Propojovací vodič z konců vinutí na svorky motoru:

Propojovací vodič použijí silikonový vodič SIF s lankovým jádrem. Teplotní třídy 180 (H).

Dodávaný průřez $0,35\text{mm}^2$ firmy Elviko s. r. o.

Impregnace: Pro Impregnaci vakuotlakým způsobem, použijeme polyestermidový impregnační lak Damisol 2053 HFP, teplotní třídy 180 (H).



Obr. č. 20. Stator motoru 4AP80 – 4, po vakuotlaké impregnaci

6. Testování izolačního stavu

Izolace v elektrických strojích má za úkol oddělit vodivé částí různých potenciálů proti magnetickým obvodům statoru, rotoru a uzemněné kostře motoru. Tato úloha klade velké požadavky na izolační, ale i mechanické a tepelné vlastnosti izolace. Proto se provádějí rozsáhlé zkoušky, jejichž účelem je prokázat dodržení žádaných vlastností izolací ve výrobě a jejich zachování v provozu. Úkolem rozsáhlých zkoušek izolace je zajistit co největší provozní jistotu elektrických strojů. Zkoušky se provádějí v souladu s požadavky kladenými na izolaci, nemají však vést k poškození nebo urychlenému stárnutí. Snahou je použít postupy, při kterých můžeme učinit závěry o jakosti izolace bez jejího porušení.

6.1. Stejnoseměrné metody

6.1.1. Měření zdánlivého izolačního odporu

Zdánlivý izolační odpor je poměr konstantního stejnosměrného napětí připojeného na vybitou izolaci a proudu, který protéká izolací ve smluveném čase. Proud protékající izolací se skládá ze tří složek (viz. Obr. č. 19):

- Kapacitní proud, který zaniká v okamžiku, kdy dosáhneme na zkoušeném předmětu plné napětí.
- Absorpční proud, který je způsobuje polarizace dielektrika.
- Vodivostní proud protékající izolací. Způsobuje činné ztráty v izolaci.

Na velikost R_{iz} negativně působí vlhkost obsažená v izolaci, znečištění stroje, produkty degradace a také konstrukce stroje. Požadovaná velikost zdánlivého izolačního odporu mezi jednotlivými fázovými vinutími a vinutí jako celku proti kostře je definovaná vztahem 5. 1.

$$R_{iz} = \frac{U_n}{\frac{S_n}{100} + 1000} \quad (M\Omega) \quad (5.1)$$

Zdánlivý izolační odpor měříme při provozní teplotě vinutí. Při teplotě vinutí 20° C, má být R_{iz} pětinašobný. Měříme déle než jednu minutu, aby došlo k ustálení hodnoty odporu.

6.1.2. Polarizační index

Desetiminutový polarizační index je definován poměrem R_{iz60} měřeného po dobu 60 sekund a R_{iz600} měřeného po dobu 600 sekund. P_{i10} je závislý především na znečištění izolace a absorbované vlhkosti v izolaci. Polarizační index je dán vztahem 5. 2.

$$P_{i10} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}} \quad (-) \quad (5.2)$$

Tabulka č. 2. Orientační hodnoty desetiminutového polarizačního indexu pro termoplastickou izolaci.

Pi_{10}	Stav izolace
Menší než 1,5	velmi špatný (vlhko, znečištění, zestárnutí)
1,5 – 2,5	navlhlá, znečištěná
2,5 - 4	suchá a čistá
4 a více	velmi suchá a čistá

Postup měření Pi_{10} :

Měříme stejnosměrné napětí o hodnotách 1 kV až 5 kV. Zkušební napětí se přiloží na vstup fáze a ostatní fáze se na vstupu uzemní. Druhé konce ostatních fází zůstanou nezapojeny. Měření provádíme ve všech třech fázích samostatně. Na záporný pól zkušebního zdroje připojujeme měřené vinutí a na kladný pól se připojí kostra elektrického stroje vodivě spojená se zemí a s ostatními vinutími.

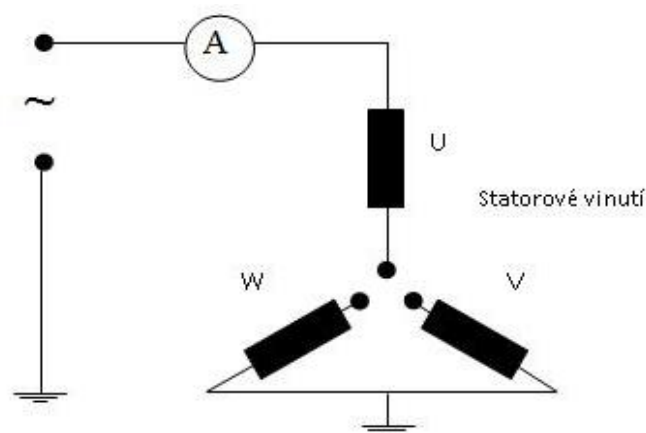
Vinutí, u kterých nejsou začátky a konce jednotlivých fází vyvedeny svorky, se zkouší jako celek, jehož vývody jsou navzájem vodivě spojeny. Před výpočtem desetiminutových polarizačních indexů musíme přepočítat hodnoty zdánlivých izolačních odporů na referenční teplotu 20 °C.

6.2. Zkoušky přiloženým napětím

6.2.1. Zkouška střídavým napětím 50 Hz

Touto zkouškou se kontrolujeme elektrickou pevnost izolace vinutí. Její minimální hodnota je dána velikostí zkušebního napětí. Tato zkouška se provádí přiloženým střídavým napětím a to jak proti kostře, tak mezi fázemi. Pro tyto zkoušky se používají různé druhy zkušebních transformátorů s plynulou regulací. Zkušební napětí má být sinusové se síťovým kmitočtem a po zvyšování napětí nejvýš od poloviny maximálního zkušebního napětí do jeho plné výšky musí na této jednu minutu setrvat. Velikost zkušebního napětí se řídí podle jmenovitého napětí stroje. Je však odstupňována také podle výkonu, podle tabulky č. 3. Zkušební transformátory mohou být vybaveny časovým vypínačem, s možností nastavení délky zkušebního času kdy po jeho uplynutí přístroj vypne vysoké napětí na zkušebních hrotech. Přístroje mají vhodnou signalizaci pro případ, že zkoušené elektrické vinutí nevyhovělo, jako signalizaci lze použít světelné nebo akustické zařízení, které upozorní na závadu.

U této zkoušky se provádí mezizkouška. Ta se provádí, když stroj ještě není impregnován, aby se případné nedostatky daly odstranit. Vinutí samostatných fází se zkouší proti kostře i mezi sebou. V případě zkoušky mezi fázemi nesmí být fáze navzájem propojeny. Po impregnaci zkoušku opakujeme. Impregnovaný stator musí být vysušen tak, aby měl vyhovující izolační odpor. Zkoušíme po dobu jedné minuty. Zkouška vyhovuje, pokud nenastal přeskok ani průraz a v průběhu zkoušky nedochází k nárůstu proudu protékajícího zkoušenou izolací.



Obr. č. 21. Zapojení při zkoušce střídavým přiloženým napětím 50 Hz.

Tabulka č. 3. Zkrácená tabulka s hodnotami zkušební napětí dle ČSN 35 0000.

stroj	Zkušební napětí (kV)
do 10 MVA	$2 U_n + 1 \text{ kV}$
Nad 10 MVA	$2 U_n + 1 \text{ kV}$
Do 2 kW	
2 – 6 kW	$2,5 U_n$
6-17 kW	$2 U_n + 3 \text{ kV}$
Nad 17 kW	Dle dohody

6.2.2. Zkouška stejnosměrným napětím

Princip zkoušky je, že dochází ke zvýšenému elektrickému namáhání izolačního systému stejnosměrným napětím. Postup měření je stejný jako u zkoušky střídavým napětím. Velikost zkušební napětí určuje ČSN 35 0000. Mezi střídavým a stejnosměrným napětím platí přepočítávací vztah 5. 3.

Při zkoušce je rozloženo napětí na vinutí v poměru odporů. Izolační systém vyhověl zkoušce přiloženým napětím, jestliže nenastal přeskok ani průraz a v průběhu zkoušky nedochází k nárůstu proudu protékajícího zkoušenou izolací.

$$U_{zss} = 1,7 \cdot U_{zst} \quad (\text{kV}) \quad (5.3)$$

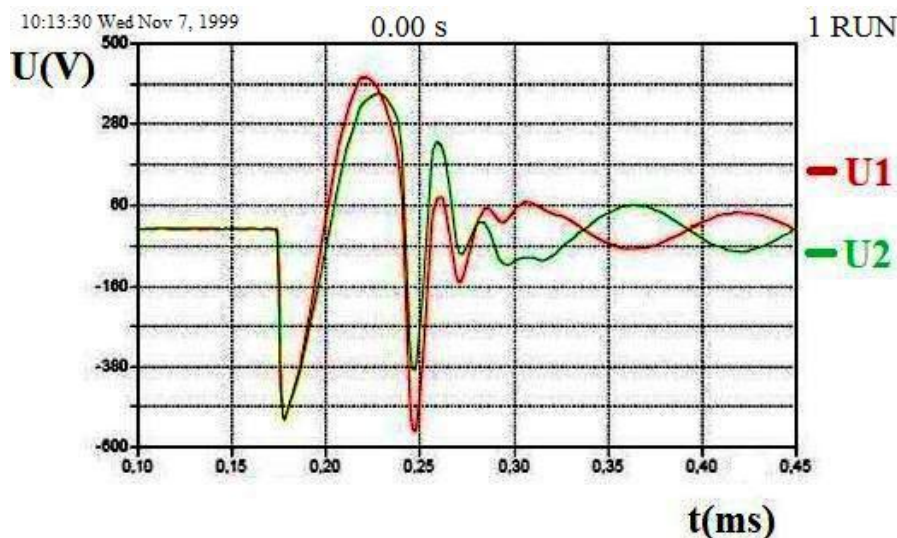
6.2.3. Zkouška napětím velmi nízkého kmitočtu

Princip zkoušky je založen na zvýšeném namáhání izolačního systému střídavým napětím velmi nízkého kmitočtu 0,1 Hz. Při zkoušce je napětí na vinutí rozloženo v poměru kapacit. Výhodou je menší výkon a nižší hmotnost zkušebního zařízení, než je u zkušebního zařízení pro zkoušky napětím průmyslového kmitočtu. Při měření zvyšujeme napětí rychlostí 5 kV za periodu až do hodnoty zkušebního napětí. Této hodnoty dosáhneme za 20 - 30 s a ponecháme 10 minut pod napětím. Potom napětí pozvolna snižujeme na nulu. Po zkoušce je nutno izolaci vybíjet minimálně 30 minut. Zkouška je vyhovující, jestliže nenastal přeskok ani průraz a v průběhu zkoušky nedošlo k nárůstu proudu protékajícího izolací zkoušeného vinutí.

6.2.4. Impulsní srovnávací zkouška

Je to jedna z modernějších zkušebních metod. Touto metodou se zkouší mezizávitová a mezifázová izolace srovnávací zkouškou strmou vlnou. Jedná se o nedestructivní metodu. Principem zkoušky je vybíjení dvou stejných kondenzátorů do dvou stejných vinutí a následného zobrazení rezonančního tlumeného děje ve vinutí, pomocí dvoukanálového osciloskopu. Pokud je jedno z vinutí poškozeno proti zemi nebo má závitový zkrat, pak jsou snímané průběhy křivek odlišné jako na obr. č. 22. Výhodou této metody je, že poruchy se dají vyhodnotit už při hodnotě špičkového napětí strmé vlny odpovídající jmenovité hodnotě zařízení.

Tato základní zjišťovací metoda je však velmi nepřesná a do značné míry závislá na úsudku obsluhujícího pracovníka.



Obr. č. 22. Průběh odezvy ve vinutí při napěťovém namáhání rázovou vlnou v případě poškození jednoho z vinutí.

6.3. Měření ztrátového činitele

Dielektrické ztráty, jsou ztráty energie vznikající v izolantech, při vyrovnávání nábojů v různých vrstvách. Rozsah potřeby energie na pokrytí těchto ztrát udává ztrátový úhel $\tan \delta$. Tento

úhel je definován jako tangens úhlu, o který se liší fázový posun proudu zkoušeného izolantu od fázového posunu proudu ideálního bezeztrátového dielektrika. Pro dielektrické ztráty platí vztah 5. 4

$$P_z = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (W) \quad (5.4)$$

Jedná se o nedestrukční zkoušku střídavým napětím, při které zjišťujeme $\operatorname{tg} \delta$. Ztrátový činitel se měří Scheringovým můstkem. Při měření postupujeme tak že se měřicí napětí z regulovatelného střídavého zdroje přiloží na vstup měřené fáze. Ostatní fáze se na vstupu uzemní. Druhé konce fází se nezapojují. Měříme ve všech třech fázích samostatně.

Vícefázové vinutí, u kterého nejsou začátky a konce jednotlivých fází vyvedeny na svorky, se zkouší jako celek, u kterého jsou vývody navzájem vodivě spojeny do izolovaného uzlu.

Na Scheringově můstku se odečítají hodnoty kapacity a ztrátového úhlu. Při měření ztrátového činitele a kapacity postupujeme podle předepsaných napětíových hladin v intervalu (0,2-1), napětí zvyšujeme po 0,2 sdružené hodnoty jmenovitého napětí. Doporučená měření jsou prováděna při teplotě vinutí 20 ± 5 °C. Hodnoty ztrátového činitele měřené při odlišných teplotách se přepočítávají na teplotu 20 °C.

Rozhodujícím činitelem pro posouzení izolačního systému není jen velikost naměřených hodnot ztrátového činitele, ale hlavně porovnání s hodnotami naměřenými při předcházejícím měření nebo před uvedením zařízení do provozu. Jsou-li přírůstky $\operatorname{tg} \delta$ u izolačního systému záporné, je možno usuzovat na nedostatečné boční vyklínování tyčí v drážkách nebo počínající působení drážkových výbojů a je nutno provést kontrolu uložení tyčí v drážkách.

6.4. Měření napětíové závislosti elektrické vodivosti

Jedná se o nedestruktivní měření. Princip metody je založen na teorii tepelného průrazu a respektuje mechanismy elektrické vodivosti v izolantech. Při překročení kritického napětí nastane nestabilní stav, dojde k narušení tepelné rovnováhy, teplota izolantu stoupá až do jeho tepelného průrazu. Měříme ve všech třech fázích samostatně stejnosměrným napětím 0,5 až 5 kV a současně měříme čas a proud protékající izolačním systémem po dobu 10 minut. Měření opakujeme při dalších napětíových hladinách vybraných z řady (1; 1,5; 2,5; 3; 5; 6; 9; 10; 15) kV, měřicí napětí však nesmí překročit hodnotu 0,5 zkušební stejnosměrné napětí a nemá být menší než 50 % sdružené hodnoty jmenovitého napětí. Z naměřených hodnot nabíjecích proudů v ustáleném stavu se pro jednotlivé napětíové stupně vypočítají hodnoty vodivosti podle vztahu 5.5

$$G_U = \frac{I_{b10}}{U} \quad (S) \quad (5.5)$$

Velikost protékajícího proudu izolačními systémy je závislá na kvalitě izolace. Grafickým záznamem těchto proudů lze vyhodnotit stav měřené izolace a vypočítat koeficient napětíové závislosti vodivosti.

7. Závěr

Při zpracování tématu s dostupnou literaturou a internetovými zdroji jsem zjistil, že v současné době se izolační systémy a elektroizolační materiály stále vyvíjejí, vznikají nové teplotně, chemicky i mechanicky odolné materiály.

Došlo také ke změnám značení teplotních tříd. Místo původních velkých písmen latinské abecedy (např. Y, A, B, atd.) se podle normy ČSN EN 60085 používají číslce s označením dovolených hodnot mezních teplot ve stupních Celsia pro dané materiály. Dospěl jsem k závěru, že elektroizolační materiály pro elektromotory nízkého napětí se používají v teplotní třídě 155 (F) oproti dříve používaným elektroizolačním materiálům teplotní třídy 130 (B).

Získané znalosti o elektroizolačních materiálech jsem následně využil v praktické části při návrhu vinutí a izolačního systému asynchronního motoru nakrátko. Zjistil jsem, že existuje mnoho různých výrobních a dodavatelských firem zabývajících se výrobou a distribucí elektroizolačních materiálů a vodičů pro vinutí elektromotorů. Jejich nabídku lze najít na internetových stránkách, včetně katalogu s technickými vlastnostmi a výrobními parametry.

V praktické části jsem se zaměřil na návrh vlastního vinutí a izolačního systému v teplotní třídě 155 (F) asynchronního motoru nakrátko. Postupně jsem přepočtl vinutí na napětí 400V, kde došlo k nepatrné změně počtu závitů v drážce, průměr nového lakovaného vodiče se nezměnil oproti původnímu. Při dalším postupu jsem navrhl drážkovou izolaci a z výpočtů ploch drážky vodičů a izolaci vypočetl činitel plnění drážky. Tento činitel je 0,7 a vyšel mi v doporučeném rozsahu. Na závěr praktické části jsem zvolil drážkové uzávěry, bandáž a prokládání čel, propojovací vodiče a typ impregnace vybraným impregnantem. Návrh vinutí jsem prakticky doložil i vlastními fotografiemi pořízenými v práci, přiloženými v kapitole 5 a v příloze č. 7.

Na závěr mohu konstatovat, že se podařilo splnit cíle mé bakalářské práce, které byly v teoretické části „popsat a rozdělit izolačními systémy střídavých motorů nízkého napětí“ a v praktické části „provedení návrhu vinutí a izolace vybraného typu motoru“. Zároveň jsem dospěl ke zjištění, že správně zvolený izolační systém dokáže prodloužit životnost elektromotorů, zabránit poruchovosti a následným provozním ztrátám.

Seznam literatury a internetových zdrojů

- [1] Kopylov, Petrovič a kol. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988. L2- C3- IV- 41f/58667.
- [2] Knotek, Jaroslav; Knotek, Jaroslav. *Navíjení a převíjení malých elektrických strojů točivých*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990. L25- E1- IV- 31f/52636.
- [3] Malý, Zdeněk; Simerský, Mojmir. *Elektrotechnologie: elektrotechnické materiály*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1985. L25- C2- II- 84/55734.
- [4] Poláček, Dušan a kol. *Elektronické tabulky*. Ostrava:Montanex, a. s. 1996. ISBN 80- 85780- 48- 8.
- [5] Heinrich, Sequenz a kol. *Technologie vinutí elektrických strojů točivých*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980. L25- B3- IV- 31/52427
- [6] Voženílek, Ladislav. *Kurs elektrotechniky*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976. L25- E1- IV- 31f/52057
- [7] Chmelík, Karel; Záliš, Karel; Mišák, Stanislav; Kozelský, Jiří. *Technická diagnostika na elektrických zařízeních*. Asociace technických diagnostiků České republiky, o. s.
- [8] <<http://www.elviko.cz/>> ze dne 6. 5. 2010
- [9] <<http://www.silent-czech.cz/>> ze dne 6. 5. 2010
- [10] <<http://www.suma-msec.cz/>> ze dne 6. 5. 2010

Seznam obrázků

Obr. č. 1. a) Příčný řez drážky S, se vsypávaným jednovrstvým vinutím, b) příčný řez drážky L se vsypávaným dvouvrstvovým vinutím [1].....	4
Obr. č. 2. Vzájemná poloha profilovaných vodičů v cívice, a) dva paralelní pásy vedle sebe, b) dva paralelní pásy pod sebou, c) čtyři paralelní pásy [1]	5
Obr. č. 3. Postup při ukládání cívek do polozavřených drážek typu F [1]	5
Obr. č. 4. Schematické znázornění tyčového vinutí a) vlnového, b) smyčkového [1]	6
Obr. č. 5. Rotory nakrátko asynchronních motorů, a) s natvrdo pájeným vinutím, b) s odlévaným vinutím [1].....	6
Obr. č. 6. Schéma zapojení jednovrstvového vinutí stejného kroku a) do věnce, b) polohově [2]	7
Obr. č. 7. Skupina soustředných cívek [2].....	8
Obr. č. 8. Schéma vinutí se soustřednými cívkami uloženými do věnce [2].....	8
Obr. č. 9. Schéma vinutí se soustřednými cívkami s polohovým uložením [2]	9
Obr. č. 10. Schéma uložení cívek zlomkového vinutí [2]	10
Obr. č. 11. Schéma jednovrstvového vinutí jednofázového motoru uloženého do věnce [2]	11
Obr. č. 12. Vakuotlaké impregnační zařízení	19
Obr. č. 13. Výsek plechu statoru a rotoru [6]	25
Obr. č. 14. Rotor nakrátko motoru 4AP80 – 4 (nahore).....	28
Obr. č. 15. Statorový svazek v kostře motoru 4AP80 – 4 (vlevo).....	28
Obr. č. 16. Přibližné hodnoty účinnosti asynchronního motoru řady 4AP do 30 kW	29
Obr. č. 17. Rozměry drážky typu S [1].....	31
Obr. č. 18. Informativní obrázky k výpočtům a) plochy drážky S b) Plochy drážkové izolace v drážce typu S.....	32
Obr. č. 19. Rozměry drážkového klínu tvaru D [1].....	34
Obr. č. 20. Stator motoru 4AP80 – 4, po vakuotlaké impregnaci	34
Obr. č. 22. Průběh odezvy ve vinutí při napětovém namáhání rázovou vlnou v případě poškození jednoho z vinutí	38

Seznam tabulek

Tabulka č. 1. s parametry drážkových izolací NEN – F.....	32
Tabulka č. 2. Orientační hodnoty desetiminutového polarizačního indexu pro termoplastickou izolaci.	36
Tabulka č. 3. Zkrácená tabulka s hodnotami zkušebního napětí dle ČSN 35 0000.	37